

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**TRABAJO FIN DE GRADO**

---

**GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ESTUDIO EN ATP DE TRANSITORIOS DE  
MANIOBRA CONTROLADA DE INTERRUPTORES  
EN BANCOS DE CONDENSADORES Y  
REACTANCIAS**

**AUTOR:** Rocholl Martín, Javier  
**TUTOR:** Víctor Julián Hernández Jiménez

Leganés, 26 de Septiembre de 2017

### AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud y apoyo recibido en momentos de flaqueza a lo largo de los años empleados para realizar esta carrera, ya que sin este apoyo de familiares y amigos más cercanos, igual no estaría aquí y ahora.

Gracias a todos ellos y a algún profesor, que me ha ayudado a no flaquear y vencer mis miedos de no poder con ello.

Agradeciendo en segundo lugar a la universidad, haberme brindado el material necesario para la realización del grado de ingeniería eléctrica que estoy concluyendo con este trabajo.

## ÍNDICE

1.	Introducción .....	9
1.1.	Objetivo .....	9
1.2.	Marco regulador .....	9
2.	ATPDraw .....	15
2.1.	Rama lineal RLC .....	15
2.2.	Interruptores.....	15
3.	Definición de elementos usados.....	16
3.1.	Red de Transporte: 400 y 220 kV.....	16
3.2.	Reactancias .....	17
3.3.	Banco de condensadores.....	17
4.	Principio de operación de los contactos de un interruptor .....	18
4.1.	Proceso de cierre.....	19
4.2.	Proceso de apertura.....	19
5.	Cálculo eléctrico para el modelo.....	20
5.1.	Datos iniciales.....	20
5.2.	Cálculo de la red eléctrica .....	20
5.3.	Cálculo de la línea eléctrica de entrada .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
5.4.	Cálculo del banco de condensador .....	22
5.5.	Cálculo de la reactancia.....	24
6.	Simulaciones iniciales con los datos obtenidos .....	25
7.	Interruptores simultáneos.....	27
7.1.	Simulación de cierre simultáneo de una carga capacitiva .....	27
7.2.	Simulación de apertura simultánea de una carga capacitiva .....	32
7.3.	Simulación de cierre simultánea de una carga inductiva.....	35
7.4.	Simulación de apertura simultánea de una carga inductiva.....	40
8.	Maniobra controlada .....	45

8.1.	Simulación de maniobra controlada de cierre de una carga capacitiva .....	45
8.2.	Simulación de maniobra controlada de apertura de una carga capacitiva .....	48
8.3.	Simulación de maniobra controlada de cierre de una carga inductiva .....	50
8.4.	Simulación de maniobra controlada de apertura de una carga inductiva .....	53
9.	Conclusiones finales .....	55
10.	Referencias.....	56
11.	Anexo I: Ilustraciones .....	56
12.	Anexo II: Tablas .....	57
13.	Anexo III: Graficas .....	57

# **1. Introducción**

## **1.1. Objetivo**

El objetivo del presente Trabajo Fin de Grado es realizar un estudio de las diferentes maniobras propias de la red eléctrica de alta tensión. Puesto que las maniobras en bancos de condensadores, bobinas y líneas pueden ser perjudiciales para la red eléctrica por la provocación de transitorios en los interruptores de potencia, lo cual crea sobretensiones y sobrecorrientes. Una forma de reducir los transitorios causados es mediante la utilización de resistencias de pre-inserción, bobinas de amortiguación o descargadores, estos elementos suelen ser inseguros e ineficaces en algunos instantes.

Una manera más eficaz de reducir los transitorios es la conmutación controlada de los interruptores, llamada estrategia de “Maniobra controlada”.

La apertura y cierre del interruptor con diferentes elementos, producen los transitorios que se van a estudiar. Para eliminar estas perturbaciones se estudiará la estrategia de maniobra controlada sobre los puntos exactos de la onda, dependiendo del elemento a maniobrar.

Dichas maniobras controladas consisten en operar el interruptor en un momento eléctrico preciso, el cual minimiza los transitorios provocados.

El éxito de dicha maniobra consiste en escoger el momento exacto dependiendo del tipo de carga que se va a conmutar. Para ello, habrá que elegir un equipo capaz de realizar el rápido procesamiento de señales digitales para realizar la conmutación de los interruptores cuando se aproxima el punto deseado en el interruptor.

Para poder llevar a cabo este estudio, se utilizará el programa ATPDraw, que nos ayudará a realizar simulaciones para elegir el mejor momento para la conmutación del interruptor.

## **1.2. Marco regulador**

Los equipos del sistema eléctrico deben protegerse ante diferentes fenómenos, en nuestro Trabajo Fin de Grado vamos a estudiar las sobretensiones. Para realizar un sistema eléctrico con riesgo de fallo igual a 0, los aparatos necesarios para cumplir dicho objetivo son muy costosos, por ello, se acepta un riesgo de fallo muy bajo pero no nulo.

Por ello, la norma UNE-EN 60071 (Coordinación de aislamiento) nos indica el aislamiento de los diferentes equipos necesarios para aislar en caso de fallo.

También nos indicará los ensayos que se deben realizar para comprobar la aptitud de los equipos para soportar sobretensiones.

La norma UNE-EN 60071 se divide en cinco partes, las cuales se presentan a continuación:

- Parte 1: Definiciones, principios y reglas
- Parte 2: Guía de aplicación
- Parte 4: Guía computacional para coordinación de aislamiento y modelado de redes eléctricas.
- Parte 5: Procedimientos para estaciones convertidoras en corriente continua.

La norma UNE-EN 60071-1, recomienda que las tensiones soportadas elegidas deben ser asociadas con la tensión más elevada que soporta el material.

Tensión soportada = Máxima sobretensión

### 1.2.1. Sobretensiones

Definición: Una sobretensión es un exceso de valor pico superior al de operación normal.

Dichas sobretensiones se clasifican según la norma UNE-EN 60071 en función de la forma y duración de sobretensión, como se muestra en la Figura 1 y Figura 2.

Tipo	Baja frecuencia		Transitorio		
	Continua	Temporal	Frente lento	Frente rápido	Frente muy rápido
Formas de onda de tensiones y sobretensiones					
Gamas de formas de onda de tensiones y sobretensiones	$f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_i \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Formas de onda de tensión normalizadas	 $f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ $T_t^a$	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	a
Ensayo de tensión soportada normalizada	a	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo impulso tipo maniobra	Ensayo impulso tipo rayo	a

<sup>a</sup> A especificar por los comités de producto correspondientes.

Figura 1. Clasificación según forma de onda y tiempo de sobretensión

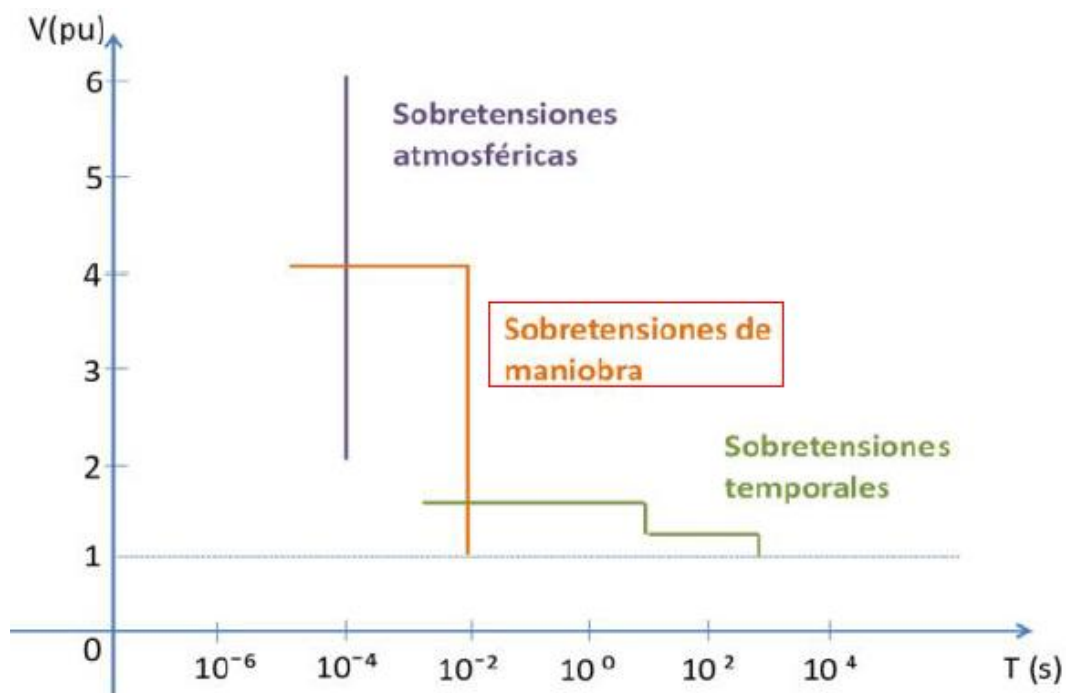


Figura 2. Clasificación según su duración

Cuando se considere adecuada la adopción de un valor máximo asumido, las sobretensiones representativas de las diferentes categorías deben ser:

- Para sobretensión temporal: una tensión normalizada a frecuencia industrial de corta duración con un valor eficaz igual al máximo valor asumido de las sobretensiones temporales divididas por  $\sqrt{2}$ .
- Para sobretensiones de frente lento: un impulso de tipo maniobra normalizado con un valor de cresta igual al valor de cresta del máximo asumido de las sobretensiones de frente lento.
- Para sobretensiones de frente rápido: un impulso de tipo rayo normalizado con un valor de cresta igual al valor de cresta del máximo asumido para sobretensiones de frente rápido fase-tierra

En los apartados 5.6 y 5.7 de la norma nos indican la lista de tensiones cresta soportadas respecto a las tensiones eficaces.

En referencia a la relación de tensiones soportadas normalizadas a frecuencia industrial de corta duración:

Valores eficaces en kV															
10	20	28	38	50	70	95	115	140	185	230	275	325	360	395	460

Tabla 1. Tensiones soportadas normalizadas

En referencia a la relación de tensiones soportadas recomendadas a frecuencia industrial de corta duración:

Valores eficaces en kV									
510	570	630	680	710	790	830	880	960	975

*Tabla 2. Tensión soportadas recomendadas*

En referencia a la relación de tensiones soportadas a los impulsos asignadas normalizadas:

Valores eficaces en kV														
20	40	60	75	95	125	145	170	200	250	325	380	450	550	650
750	850	950	1050	1175	1300	1425	1550	1675	1800	1950	2100	2250	2400	

*Tabla 3. Tensión soportadas normalizadas*

Para la elección del nivel de aislamiento normalizado, nos dirigimos al punto 5.10 de la UNE-EN 60071 -5, este punto nos indica las tensiones soportadas normalizadas con respecto a los niveles de tensión en régimen permanente.

Los tipos de gama de tensiones más elevadas del material normalizadas son los siguientes:

- **Gama I:** Superiores a 1 kV hasta 245 kV inclusive. Los distintos aspectos relativos a la explotación debe, por tanto, ser tenidos en cuenta en la selección del nivel de aislamiento asignado del material.
- **Gama II:** Superiores a 245 kV (tabla 3). Esta gama incluye principalmente redes de transporte.

A continuación se muestran las tablas de niveles de aislamientos normalizados de cada gama. [1]



Tensión más elevada del material ( $U_m$ ) kV (valor eficaz)	Tensión soportada asignada normalizada a frecuencia industrial de corta duración kV (valor eficaz)	Tensión soportada asignada normalizada a impulso tipo rayo kV (valor de cresta)
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
17,5 <sup>a</sup>	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170
52 <sup>a</sup>	95	250
72,5	140	325
100 <sup>b</sup>	(150)	(380)
	185	450
123	(185)	(450)
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170 <sup>a</sup>	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1 050
NOTA Si los valores entre paréntesis se consideran insuficientes para demostrar el cumplimiento de las tensiones soportadas requeridas entre fases, se necesitan ensayos adicionales de tensión soportada entre fases.		
<sup>a</sup> Estos $U_m$ no son valores preferenciales en la Norma IEC 60038 y por lo tanto no se dan estas combinaciones normalizadas muy frecuentemente en las normas de producto.		
<sup>b</sup> Estos valores de $U_m$ no se mencionan en la Norma IEC 60038, pero se han incluido en la gama I en ciertas normas de producto.		

Tabla 4. Nivel de aislamiento normalizado para la gama I

Tensión más elevada del material ( $U_m$ ) kV (valor eficaz)	Tensión soportada asignada normalizada a impulso tipo maniobra			Tensión soportada asignada normalizada a impulso tipo rayo <sup>b</sup> kV (valor de cresta)
	Aislamiento longitudinal <sup>a</sup> kV (valor de cresta)	Fase a tierra kV (valor de cresta)	Fase-fase (relación con el valor de cresta fase-tierra)	
300 <sup>c</sup>	750	750	1,50	850
				950
	750	850	1,50	950
				1 050
362	850	850	1,50	950
				1 050
	850	950	1,50	1 050
				1 175
420	850	850	1,60	1 050
				1 175
	950	950	1,50	1 300
				1 300
	950	1 050	1,50	1 425
550	950	950	1,70	1 175
				1 300
	950	1 050	1,60	1 300
				1 425
	950 1 050	1 175	1,50	1 425
				1 550
800	1 175	1 300	1,70	1 675
				1 800
	1 175	1 425	1,70	1 800
				1 950
	1 175 1 300	1 550	1,60	1 950
				2 100
NOTA La introducción de $U_m$ por encima de 800 kV está en estudio, y 1 050 kV, 1 100 kV y 1 200 kV se dan como $U_m$ en la Norma IEC 60038 Modificación 2, 1997.				
<sup>a</sup> Valores de la componente a impulso del ensayo combinado correspondiente, mientras que el valor de cresta de la componente a frecuencia industrial de polaridad opuesta es $U_m \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$ .				
<sup>b</sup> Estos valores se aplican de igual forma a aislamiento fase-tierra y fase-fase; para el aislamiento longitudinal se aplica como la componente a impulso tipo rayo asignada normalizada de la tensión soportada asignada normalizada combinada, mientras que el valor de cresta de la componente a frecuencia industrial de polaridad opuesta es $0,7 \times U_m \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$ .				
<sup>c</sup> Esta $U_m$ no es un valor preferencial en la Norma IEC 60038.				

Tabla 5. Nivel de aislamiento normalizado para la gama II

## 2. ATPDraw

El programa elegido es ATP (Alternative Transients Program), el cual sirve para simular problemas transitorio y nos permite crear el circuito eléctrico deseado. El programa da opción a elegir entre diferentes elementos y configurarlos a nuestra necesidad, según los parámetros deseados por el programa. A raíz de esto genera el archivo ATP en el formato apropiado basado en *“What you see is what you get”* (Lo que ves es lo que consigues). [2]

En nuestro caso el elemento que vamos a conectar a la red eléctrica es el siguientes:

- Rama lineal RLC de 3 fases en Estrella: Componente utilizado para crear el banco de condensadores y las reactancias.

### 2.1. Rama lineal RLC

ATP nos ofrece la posibilidad de trabajar con diferentes modelos lineales RLC, para llevar a cabo el estudio de diferentes transitorios electromagnéticos, según la complejidad del problema a resolver. El programa nos da la posibilidad de elegir la configuración de conexión de nuestra rama lineal RLC entre serie, estrella o triángulo.

En nuestro caso vamos a utilizar la configuración en estrella, los parámetros y modelación de dicha rama será explicado en el capítulo 5.

### 2.2. Interruptores

Tenemos que explicar que desde el punto de vista eléctrico, los interruptores realizan la orden de apertura y se produce un arco eléctrico, y el corte se produce en un valor muy próximo a cero y, además, no existe una modelización de la dinámica no lineal de arco del interruptor y de las pérdidas. En este trabajo vamos a usar interruptores controlados por tiempo.

Dichos interruptores se especifican el instante en el que se va a producir el cierre y/o la apertura de los interruptores. El tiempo de corte de la corriente depende del momento en el que se produce la orden de apertura y del momento del paso por cero de la corriente

Para poder simular el corte del interruptor con un valor de corriente distinto de cero, el programa permite un margen para que se produzca la apertura del interruptor por debajo de corriente asignada. [3]

### **3. Definición de elementos usados**

#### **3.1. Red de Transporte: 400 y 220 kV**

Esta red parte de las subestaciones elevadoras uniendo los grandes centros de interconexión del país y a su vez con los de consumo. Su gran misión es el transporte de potencia a grandes distancias con las menores pérdidas posibles.

La Ley 17/2007, del 4 de julio, confirmó la condición de Red Eléctrica como gestor de la red de transporte y le atribuyó la función de transportista único, en régimen de exclusividad. Red Eléctrica adquirió en 2010, los activos de Baleares y Canarias, junto con el resto de los activos peninsulares pendientes de transferir de las empresas eléctricas. Red Eléctrica es responsable del desarrollo y ampliación de la red, su mantenimiento, gestión de tránsito de electricidad entre sistemas exteriores y la península y garantizar el acceso de terceros a la red en condiciones de igualdad. [4]

La red de transporta está compuesta por más de 43.000 Km de líneas de alta tensión, más de 5.000 subestaciones y más de 85.000 MVA de capacidad de transformación, que configuran una red mallada, segura y fiable. [4]

##### **3.1.1. Mantenimiento de la red**

Ahora hablaremos un poco sobre el mantenimiento de estas redes de transporte.

Red Eléctrica al tener la misión de garantizar que las instalaciones de la red se encuentren en condiciones óptimas de disponibilidad y fiabilidad, tiene un establecimiento de políticas de mantenimiento, renovación y mejora adecuadas. Con lo cual se establece un programa anual en el que se recogen todas las actividades y recursos necesarios para garantizar la continuidad del suministro eléctrico. Sus actuaciones se centran en la mejora de la calidad de las instalaciones, la innovación tecnológica de forma continuada, la optimización y eficiencia de los recursos y en la mejora de los activos de red que conforman el Proyecto MAR (Mejora de Activos de Red)

Tras ser nombrado como transportista único peninsular, Red Eléctrica puso en marcha el Proyecto MAR, para integrar y mejorar las instalaciones, adecuándolas a los estándares de calidad de las infraestructuras peninsulares.

Este proyecto está siendo desarrollado desde 2011 hasta 2018 y sus objetivos son:

- Adecuar las nuevas infraestructuras a los estándares de calidad de la península.
- Resolver las carencias de la red de transporte existente.
- Integrar los activos adquiridos en los sistemas de control de Red Eléctrica.

- Aplicar un plan de mantenimiento adaptado a las singularidades de los sistemas eléctricos no peninsulares. [4]

### **3.2. Reactancias**

La reactancia inductiva ( $X_L$ ) es la capacidad que tiene un inductor para reducir la corriente en un circuito de corriente alterna.

La acción de un inductor es tal que se opone a cualquier cambio en la corriente. Como la corriente alterna cambia constantemente, un inductor se opone de igual manera a ello, por lo que reduce la corriente en un circuito de corriente alterna.

La reactancia de una bobina es inversamente proporcional a dos factores: La inductancia y la frecuencia del voltaje aplicado. [4]

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

Las reactancias de compensación aumentan la eficacia en sistemas de transmisión de energía mejorando la calidad de la potencia y reduciendo los costes de transmisión. Al combinar bajos costes del ciclo de vida y un alto rendimiento, las reactancias de compensación reforzarán sus resultados finales.

Las reactancias de compensación son la manera más compacta y rentable de compensar la generación de potencia reactiva en largas líneas de transmisión de potencia de alta tensión y sistemas de cable. Se pueden usar permanentemente para estabilizar la transmisión de potencia o se puede activar bajo condiciones de carga reducida solo para el control de la tensión.

En largas líneas de transmisión, la potencia reactiva se produce como efecto de la capacitancia entre las líneas y la tierra. La energía reactiva no se puede usar para ninguna aplicación y se debe equilibrar para reducir pérdidas de energía. Las reactancias de compensación absorben la potencia reactiva, de este modo aumenta el rendimiento de la energía del sistema.

En cargas bajas, la tensión aumenta a lo largo de la línea de transmisión. Una reactancia de compensación reduce el aumento de la tensión, mantiene la tensión dentro de los límites deseados y contribuye a la estabilidad de la tensión del sistema. [5]

### **3.3. Banco de condensadores**

La reactancia capacitiva ( $X_C$ ) es la propiedad que tiene un condensador en un circuito de corriente en un circuito de corriente alterna.

Al introducir un condensador eléctrico en un circuito de corriente alterna, las placas se cargan y la corriente eléctrica disminuye a cero. Por lo tanto, el condensador se comporta como una resistencia aparente. Pero en virtud de que está conectado a una fuerza electromagnética

alterna se observa que a medida que la frecuencia de la corriente aumenta, el efecto de resistencia del capacitor disminuye.

Como un condensador se diferencia de una resistencia pura por su capacidad para almacenar cargas, el efecto que produce de reducir la corriente se le da el nombre de reactancia capacitiva ( $X_c$ ). El valor de ésta en un capacitor varía de manera inversamente proporcional a la frecuencia de la corriente alterna. Donde su expresión matemática es: [4]

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

En nuestro caso, la utilización de los condensadores tiene una doble finalidad, pudiendo emplearlo de las siguientes formas:

- El control de tensión: se conectan para subir tensión, típico de las redes de transporte y reparto (400, 220, 132, 66, y 45kV)
- Mejorar el factor de potencia: su objetivo es disminuir los flujos de potencia reactiva en las redes. Para este efecto, se colocan en las redes de media tensión y baja tensión (20, 15kV y 400/230V). [5]

Los beneficios relacionados con la instalación de un banco de condensadores en la red eléctrica son:

- Aumentar los ingresos en un porcentaje considerable mediante la compensación de energía reactiva.
- Reducir las pérdidas por calentamiento en los conductores y transformadores.
- Incrementar la disposición de carga en el transformador de potencia.
- Eliminar el importe de energía reactiva en la facturación de energía eléctrica.
- Mejorar el nivel de tensión.

#### **4. Principio de operación de los contactos de un interruptor**

Para un mejor entendimiento de las gráficas y simulaciones realizadas en este Trabajo Fin de Grado, necesitamos entender el funcionamiento de un interruptor.

La orden de apertura y cierre de un realiza por medios mecánicos. Cuando los contactos se separan se forma un entrehierro Entre los polos del interruptor se interpone un medio dieléctrico e interruptivo (aire, gas SF6, vacío, aceite). En este medio se forma un arco eléctrico, a través del cual fluye una corriente de una parte del contacto hacia la otra, cerrando así el circuito. En este entrehierro es donde el circuito es vulnerable a ser interrumpido, ya que

corriente forma un arco en el medio aislante y logra disminuir la conductividad de esta trayectoria hasta extinguir el arco, eliminando el flujo de corriente por el interruptor.

El interruptor tiene dos funciones principales: la primera es interponer un entrehierro a la trayectoria original de la corriente, y el segundo es la eliminación de la conductividad del entrehierro, eliminando así la corriente e interrumpiéndola.

El principio fundamental de este proceso es la velocidad de restablecimiento del medio dieléctrico en el entrehierro. Para un entrehierro con un medio aislante gaseoso, el gas es semiconductor a altas temperaturas y en función de su enfriamiento se vuelve aislante. [6]

#### **4.1. Proceso de cierre**

Los interruptores deben cerrar e interrumpir los circuitos, por lo que pueden producirse problemas, sobre todo si la diferencia de potencial en el interruptor no es nula. Cuando el circuito se encuentra abierto, consecuencia de que el interruptor también se encuentra abierto, la tensión en los terminales del interruptor no es nula (tensión de cierre).

La corriente máxima que fluye al realizarse el cierre del interruptor se le llama “corriente de cierre”. La “potencia de cierre” es el producto de la tensión de cierre por la corriente de cierre.

El tiempo de cierre de un interruptor es el que transcurre desde el momento de energizar la bobina de cierre hasta la conexión física de los contactos principales. Durante el cierre, existen esfuerzos eléctricos entre los contactos mientras estos se acercan, estableciéndose arcos de pre-encendido que ocasionan desgaste adicional de los contactos. [6]

#### **4.2. Proceso de apertura**

Si estando cerrado el interruptor se desea interrumpir el circuito, se libera el mecanismo de apertura el cual permite que los contactos principales se separen. Al realizar la separación de los contactos se genera un arco eléctrico. Dicho arco cumple una función muy importante durante la interrupción, dependiendo del tipo de medio de extinción del interruptor.

La potencia de cortocircuito que el interruptor es capaz de interrumpir, está dada por el producto de la corriente de cortocircuito simétrica y la tensión de restablecimiento, un ciclo después de la interrupción. Generalmente se expresan los kA de corriente interruptiva nominal simétrica para indicar la capacidad de cortocircuito del interruptor. El tiempo de interrupción está dado desde el momento en que se energiza la bobina de apertura hasta la extinción del arco eléctrico. Este tiempo consta de dos partes: el tiempo propio desde la energización de la bobina de apertura hasta la separación física de contactos y el tiempo de arco.

Al realizar la interrupción del circuito, el interruptor se encuentra sometido a una amplia gama de corrientes con características capacitivas, inductivas, resistivas o combinaciones de éstas.

La interrupción de la corriente consiste en eliminar la ionización causada por la apertura del interruptor en el entrehierro con el objetivo de que la corriente no fluya a través de él.

El fabricante de interruptores debe tomar en cuenta los efectos de las corrientes de falla para un diseño adecuado del interruptor. [6]

## **5. Cálculo eléctrico para el modelo**

Para realizar el estudio de transitorios deseados en nuestro Trabajo Fin de Grado es necesario la modelación de diferentes elementos, los cuales vamos a calcular a continuación:

- Red eléctrica de entrada
- Banco de Condensadores
- Reactancia

### **5.1. Datos iniciales**

Son los datos facilitados por el tutor para realizar poder realizar las simulaciones de la forma más real posible.

- Tensión red = 220.000 V
- Frecuencia red = 50 Hz
- Intensidad de cortocircuito de la línea de entrada = 10.000 A
- Relación de impedancia de la línea de entrada = 0,1
- Potencia del banco de condensadores = 10 MVar
- Constante de tiempo del banco de condensadores = 0,15 seg
- Potencia de la reactancia = 10 MVar
- Constante de tiempo del banco de bobinas = 0,15 seg

### **5.2. Cálculo de la red eléctrica de entrada**

Los datos principales para realizar el modelo de una red eléctrica son la tensión de la red, la frecuencia, y la impedancia los cuales dos de ellos se han citado anteriormente y son:

- Tensión red = 220.000 V
- Frecuencia red = 50 Hz



En la Ilustración 1 se observa la configuración seleccionada para la simulación de una fuente trifásica.

*Ilustración 1. Fuente eléctrica modelada en ATP*

Mientras que el último dato por hallar lo calculamos a continuación. Los datos principales son los expuestos seguidamente: resistencia de la línea y la inductancia de la línea.

Para la obtención de estos valores se han realizado los siguientes cálculos con una intensidad de cortocircuito de 10 kA facilitada por el tutor.

Impedancia de línea:

$$Z_{línea} = \frac{U_{línea}}{I_{cc}}$$

$$Z_{línea} = \frac{220.000}{10.000} = 22 \, \Omega$$

La relación de impedancia para nuestra modelación será de 0,1, lo que conlleva a poder calcular la resistencia y la reactancia de la línea como se observa a continuación.

$$Z_{línea} = \sqrt{R^2 + X_l^2}$$

$$Relación \, de \, impedancia = R/X_l = 0,1$$

Sustituyendo, los valores de la resistencia y la reactancia son:

- Resistencia = 2,18908  $\Omega$
- Reactancia inductiva = 21,89082  $\Omega$

Para hallar el valor de la inductancia se utiliza la siguiente formula:

$$X_l = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

- Inductancia = 69,6806 mH

En la Ilustración 2 se observa la configuración de la línea de entrada simulada en el programa ATPDraw.

DATA	UNIT	VALUE
R0	Ohm/m	2.18908
L0	mH/m	69.6806
C0	uF/m	0
R+	Ohm/m	2.18908
L+	mH/m	69.6806
C+	uF/m	0

NODE	PHASE	NAME
In	ABC	X0003
Out	ABC	X0005

Order: 0    Label:   

Comment:   

Lines  
Length 1 [m]    ☐ Hide    ☐ \$Vintage,1

Edit definitions    OK    Cancel    Help

*Ilustración 2. Línea eléctrica de entrada modelada en ATP*

### 5.3. Cálculo del banco de condensador

El banco de condensadores elegido para las simulaciones es de 10 MVAr, pero para llegar a modelarlo en el programa, hay que calcular la capacidad eléctrica, utilizando la siguiente formula.

$$C = \frac{Q_c}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U^2} = \frac{10.000.000}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 220.000^2}$$

- Capacidad eléctrica = 0,65766 uF

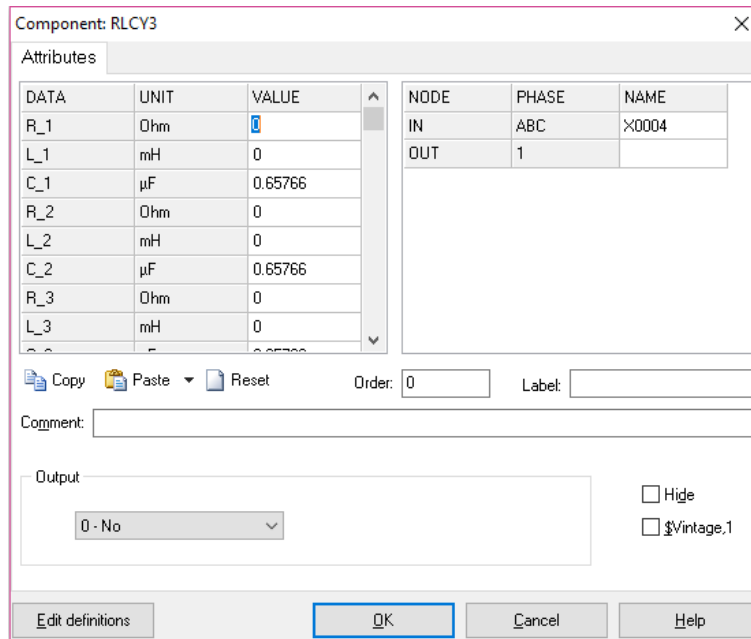


Ilustración 3. Banco de condensadores modelada en ATP

Para una mejor modelación de un banco de condensador real, se modela una batería de resistencia en paralelo al banco, para poder realizar la simulación de las pérdidas de carga y descarga en un banco de condensadores. Dicha batería de resistencias está relacionado con el banco de condensadores con una constante de tiempo ( $\tau$ ), cuyo valor es de 0,15 seg.

$$R = \frac{\tau}{5 \cdot C} = \frac{0,15}{5 \cdot 0,65766\mu}$$

- Resistencia = 228.079,62  $\Omega$

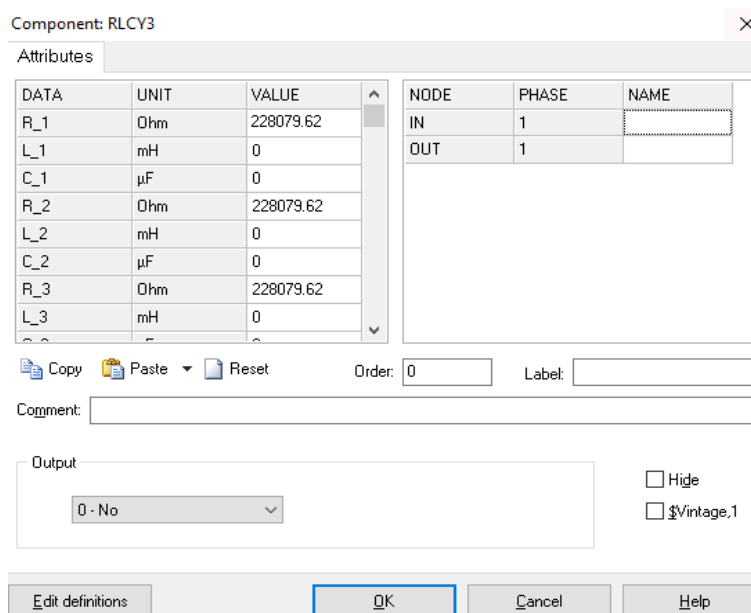


Ilustración 4. Batería de resistencias para la simulación real del condensador modelada en ATP

En la Ilustración 3 y Ilustración 4 se observa la configuración realizada en ATPDraw para la simulación de una batería de condensadores real.

El esquema básico del sistema eléctrico conectado a un banco de condensadores real se modela en la Ilustración 5:

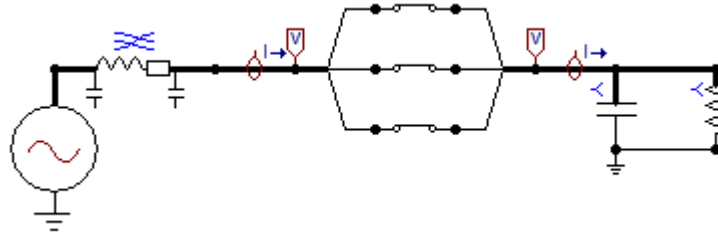


Ilustración 5. Esquema básico de la conexión de un banco de condensadores real

#### 5.4. Cálculo de la reactancia

El banco de reactancias elegido en las simulaciones es de 10 MVar, pero para llegar a modelarlo, hay que calcular la inductancia.

$$L = \frac{U^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot Q_L} = \frac{220.000^2}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10.000.000}$$

- Inductancia = 15,40619 mH

Para una mejor modelación de un banco de reactancias real, se modela una batería de resistencia en serie al banco de reactancias. Dicha batería de resistencias está relacionado con el banco de reactancias con una constante de tiempo ( $\tau$ ), el cual es de 0,15 seg.

$$R = \frac{5 \cdot L}{\tau} = \frac{5 \cdot 15,40619\text{m}}{0,15}$$

- Resistencia = 102,708  $\Omega$

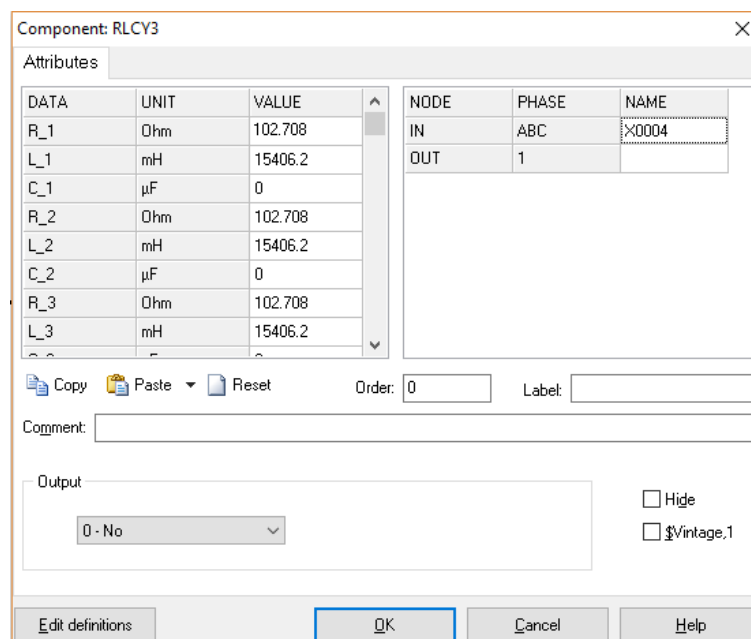
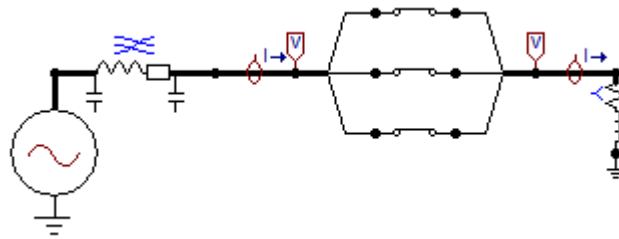


Ilustración 6. Banco de reactancias real modelada en ATP

En la Ilustración 6 se observa la configuración en ATPDraw para la modelación de un banco de reactancias real.

El esquema básico del sistema eléctrico conectado a un banco de condensadores es el siguiente:



*Ilustración 7. Esquema básico de la conexión de un reactor tipo shunt*

## 6. Simulaciones iniciales con los datos obtenidos

Las simulaciones iniciales realizadas con el programa ATPDraw después de las configuraciones anteriormente descritas, nos ilustran las ondas sinusoidales a régimen permanente y con ello, obtenemos las corrientes y tensiones nominales y máximas. Siendo estos valores:

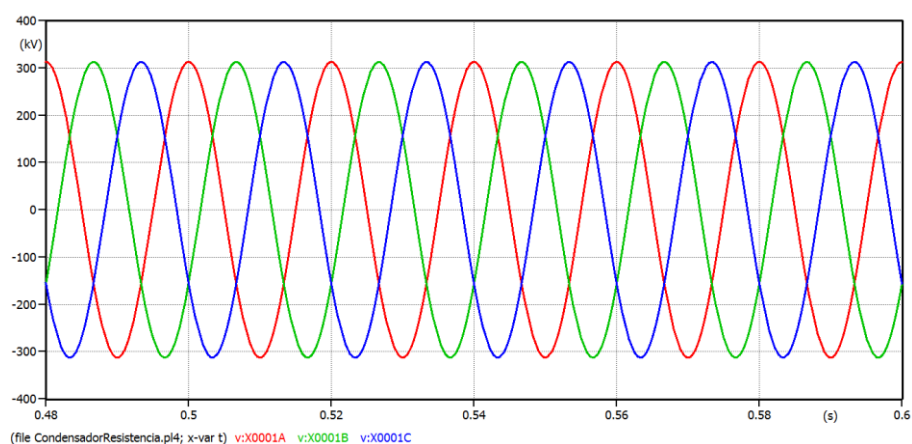
- Tensión red nominal = 221.000 V
- Tensión de pico = 312.550 V
- Corriente red nominal = 45,67 A
- Corriente de pico = 64,588 A

Vamos a graficar la tensión de la red en régimen permanente (Gráfica 1), la corriente permanente conectando un banco de condensadores (Gráfica 2) y la corriente permanente conectando un banco de inductancias (Gráfica 3), para saber tanto la tensión como las corrientes nominales de los sistemas.

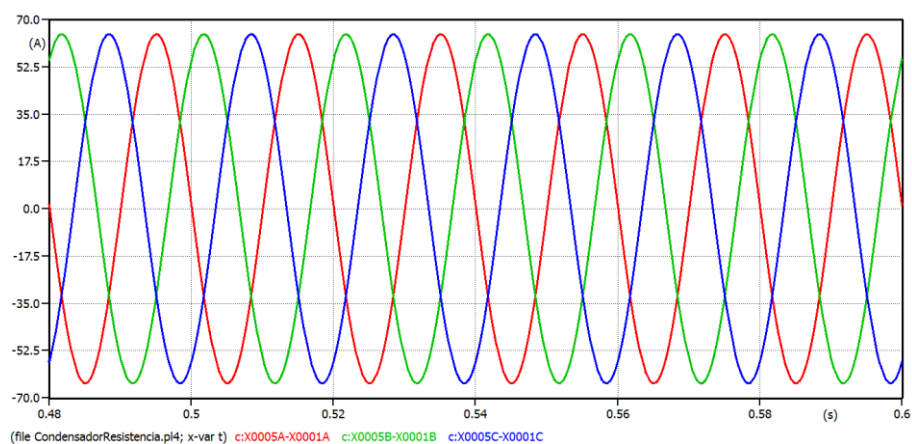
Leyenda:

- V:X0001A: Tensión de la red en la Fase A
- V:X0001B: Tensión de la red en la Fase B
- V:X0001C: Tensión de la red en la Fase C
- V:X0002A: Tensión de la carga en la Fase A
- V:X0002B: Tensión de la carga en la Fase B
- V:X0002C: Tensión de la carga en la Fase C
- C:X0002A- X0004A: Corriente de la carga en la Fase A
- C:X0002B- X0004B: Corriente de la carga en la Fase B

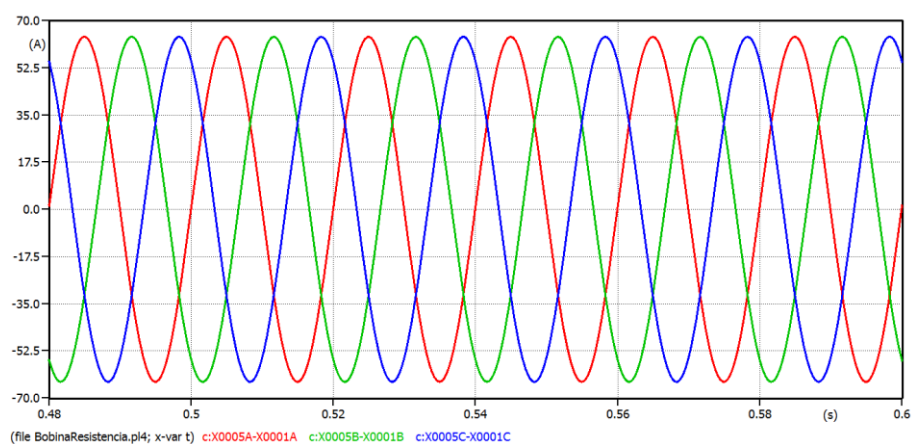
- C:X0002C- X0004C: Corriente de la carga en la Fase C



Gráfica 1. Tensión de la red en régimen permanente



Gráfica 2. Corriente de la red en régimen permanente, conectado un banco de condensadores



Gráfica 3. Corriente de la red en régimen permanente, conectado un reactor tipo shunt

Como se observa en las gráficas anteriores, las corrientes están desfasas respecto a la tensión. Las ondas en régimen permanente son sinusoidales, mientras que al realizar el cierre o la apertura de los interruptores se realizan transitorios, los cuales en este Trabajo Fin de Grado vamos a estudiar e intentar reducir y si es posible eliminar.

## 7. Interruptores simultáneos

Vamos a realizar el cierre y la apertura simultánea de los interruptores de potencia que conectan las diferentes cargas con el sistema de la red eléctrica. Realizaremos un total de 10 simulaciones sobre las ondas de tensión y corriente, variando el punto de apertura y cierre de los interruptores a lo largo de un periodo de 10 ms. Iniciando el cierre a los 500 ms, aumentando en 1 ms cada simulación, para así estudiar la mitad de una onda sinusoidal de 50 Hz.

### 7.1. Simulación de cierre simultáneo de una carga capacitiva

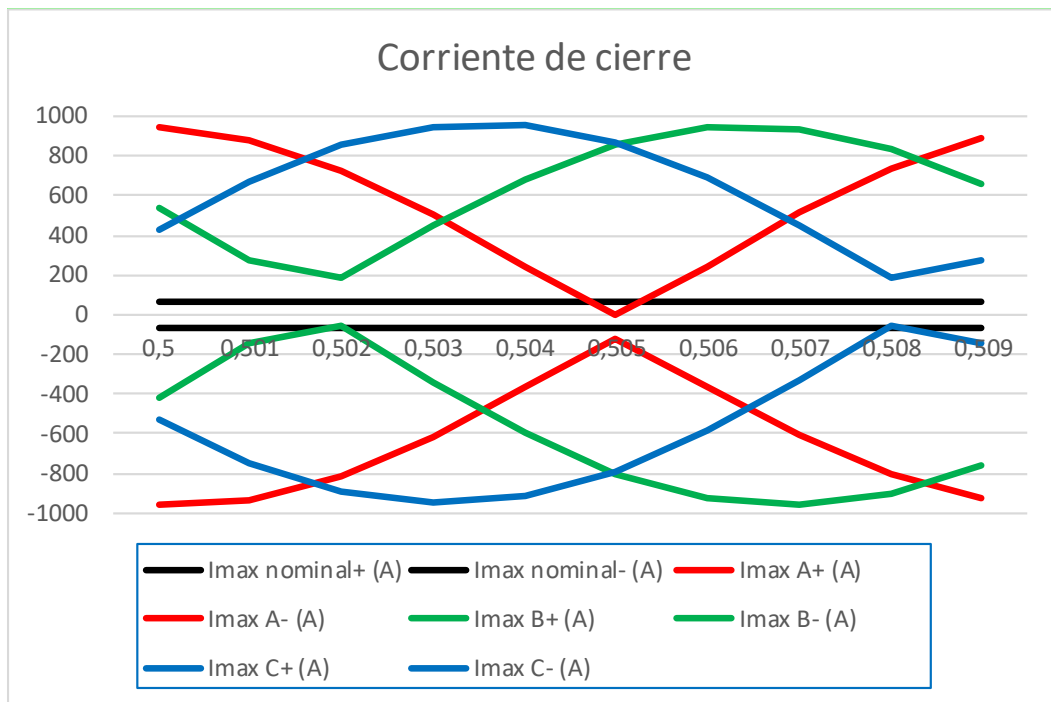
Al realizar el cierre simultáneo de los interruptores se observa unos transitorios elevados tanto en la corriente como en la tensión, lo que puede conllevar a un fallo del sistema.

En la gráfica también se muestra el valor de pico que alcanza la onda de tensión de fase en régimen permanente, como referencia de los valores máximos de tensión se producen al realizar el cierre de los interruptores.

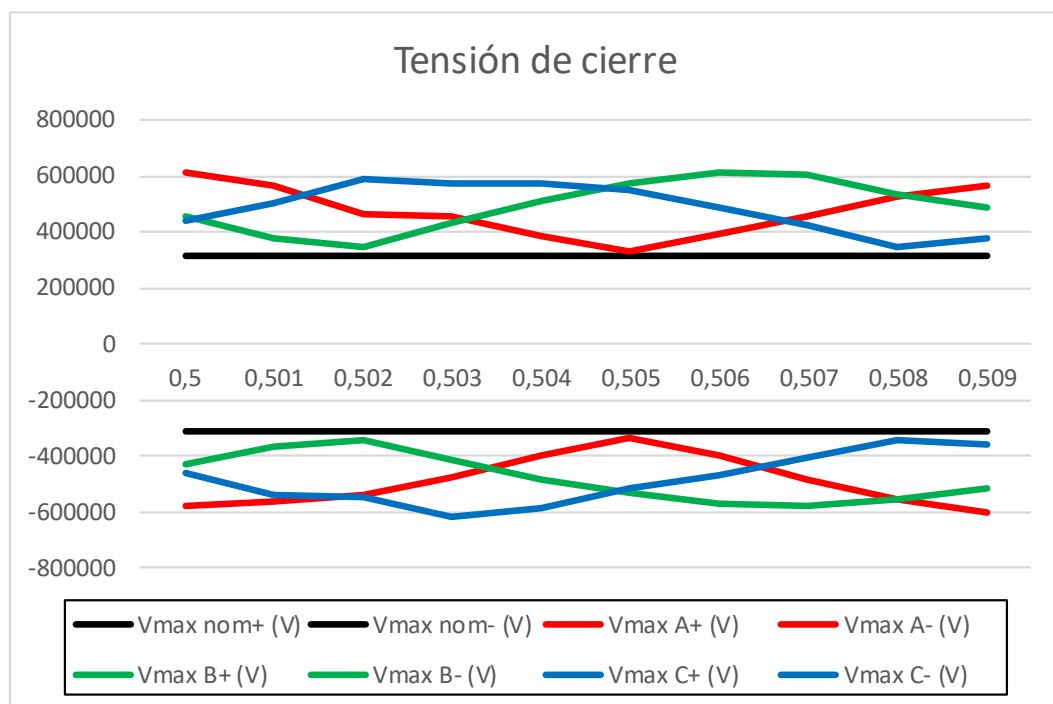
Los resultados obtenidos de las diez simulaciones se observan en la Tabla 6 y dichos datos se representan en la Gráfica 4 y Gráfica 5.

Tiempos de cierre (s)				Corriente máxima en el cierre (A)						Tensión máxima en el cierre (V)					
Simulaciones	A	B	C	I <sub>max</sub> A+	I <sub>max</sub> A-	I <sub>max</sub> B+	I <sub>max</sub> B-	I <sub>max</sub> C+	I <sub>max</sub> C-	V <sub>max</sub> A+	V <sub>max</sub> A-	V <sub>max</sub> B+	V <sub>max</sub> B-	V <sub>max</sub> C+	V <sub>max</sub> C-
1	0,5	0,5	0,5	948	-960	538	-422	423	-533	613580	-575480	452090	-431740	439720	-461930
2	0,501	0,501	0,501	882	-933	270	-144	673	-749	564330	-566230	373080	-364740	504380	-536050
3	0,502	0,502	0,502	730	-814	181	-57	852	-893	459920	-535250	348370	-342520	588700	-548970
4	0,503	0,503	0,503	508	-617	448	-338	949	-950	453340	-477000	433630	-416310	572170	-618320
5	0,504	0,504	0,504	238	-362	684	-598	952	-914	384700	-396310	509860	-481600	576050	-587870
6	0,505	0,505	0,505	3	-127	854	-801	864	-790	328870	-331930	573090	-533490	549900	-515530
7	0,506	0,506	0,506	243	-360	941	-926	690	-580	388770	-401060	615120	-570590	485130	-469030
8	0,507	0,507	0,507	516	-611	936	-961	452	-331	458640	-485490	604620	-579620	425960	-407950
9	0,508	0,508	0,508	741	-806	840	-903	181	-54	521740	-557930	535500	-558540	347880	-342760
10	0,509	0,509	0,509	894	-922	663	-757	269	-148	562830	-605250	483740	-514950	373130	-362540

Tabla 6. Resultados de la simulaciones realizadas en el punto de cierre con un banco de condensadores



Gráfica 4. Valores de la intensidad de la Tabla 6



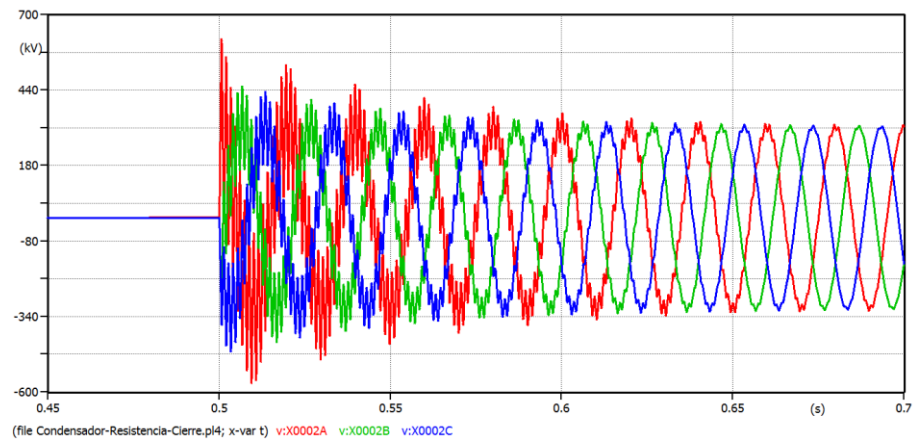
Gráfica 5. Valores de la tensión de la Tabla 6

Seguidamente se muestran algunas de las simulaciones realizadas para la obtención de las gráficas anteriores.

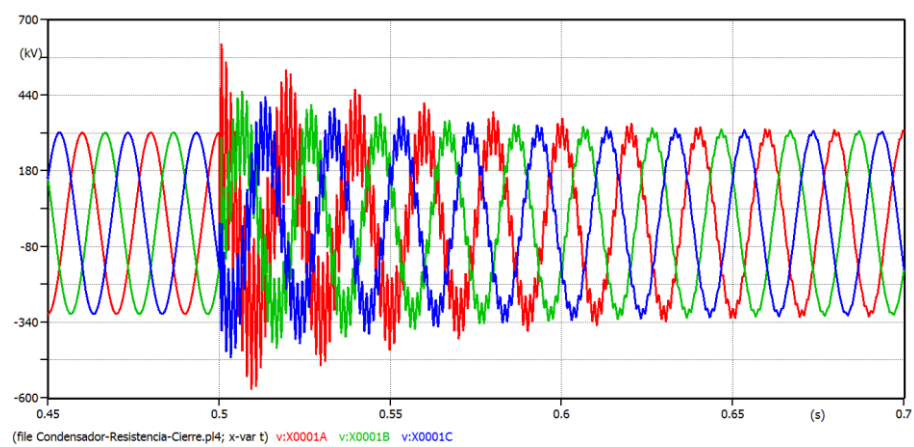
### 7.1.1. Simulación 1

En las gráficas siguientes se observan los transitorios surgidos al realizar el cierre de forma simultánea en el segundo 0,5.

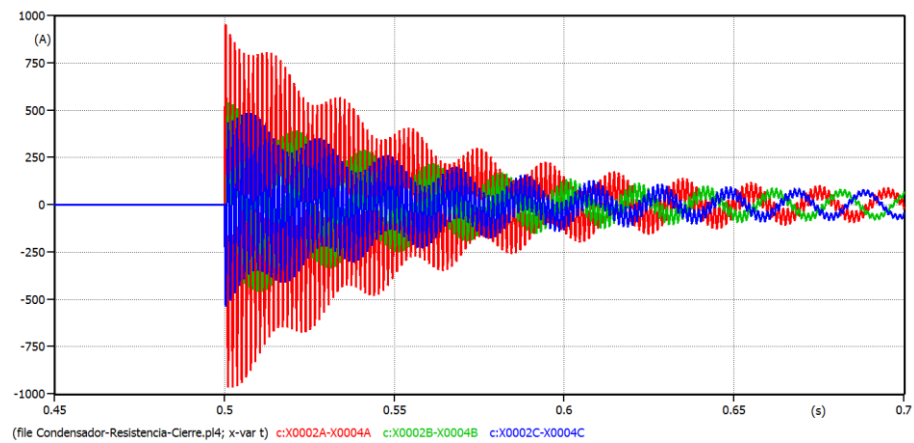




Gráfica 6. Tensión en el lado del banco de condensadores en la simulación 1



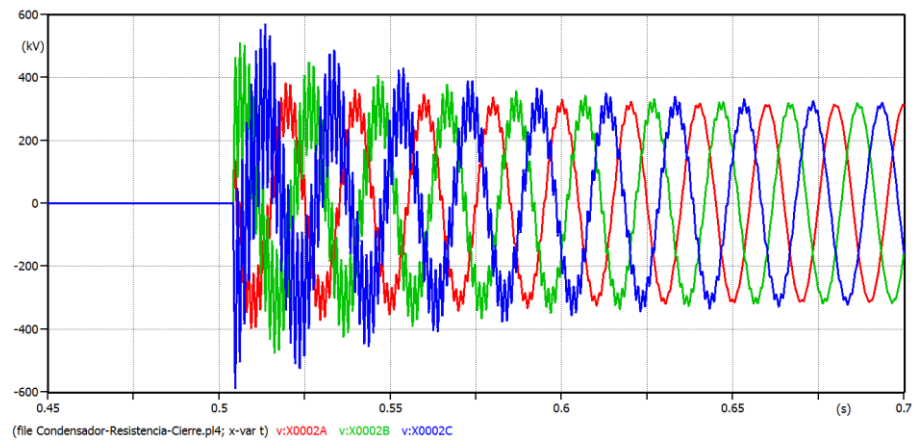
Gráfica 7. Tensión en el lado de la red en la simulación 1



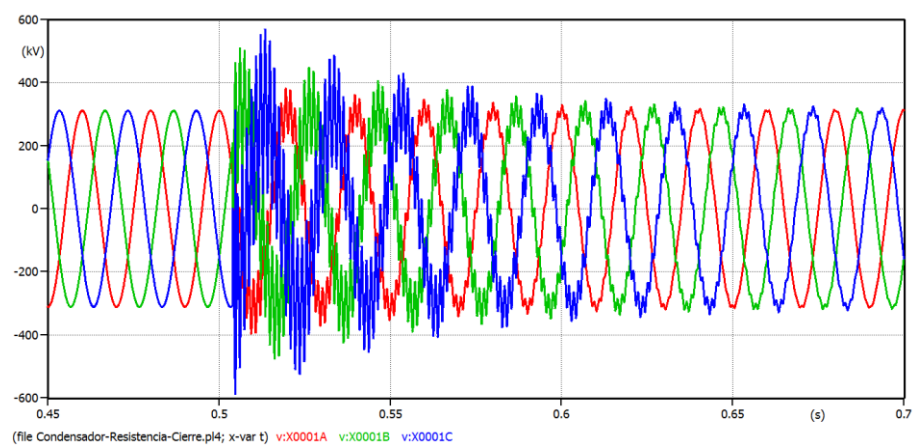
Gráfica 8. Corriente en el lado del banco de condensadores en la simulación 1

### 7.1.2. Simulación 5

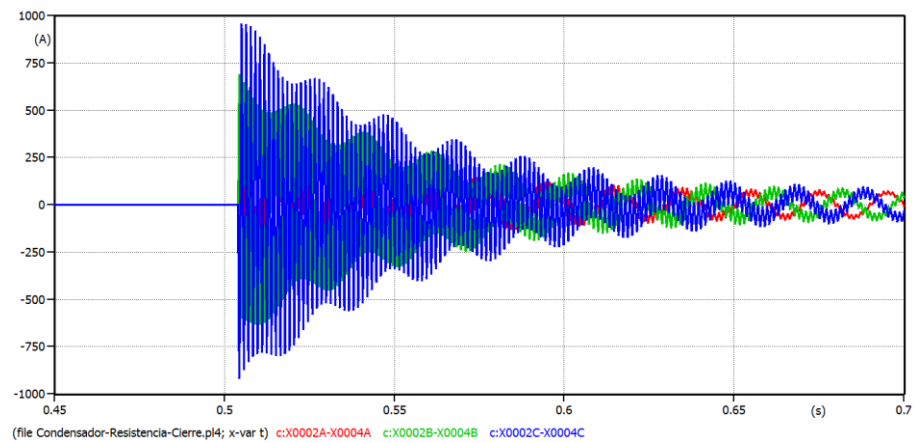
En las gráficas siguientes se observan los transitorios surgidos al realizar el cierre de forma simultánea en el segundo 0,504.



Gráfica 9. Tensión en el lado del banco de condensadores en la simulación 5



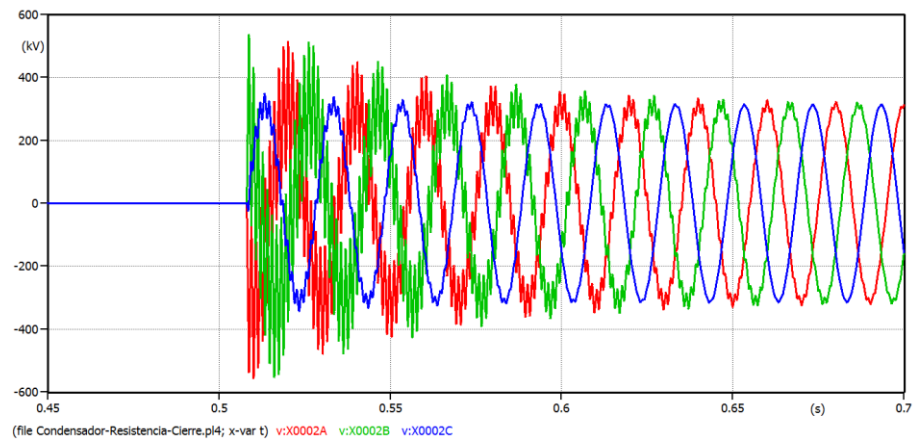
Gráfica 10. Tensión en el lado de la red en la simulación 5



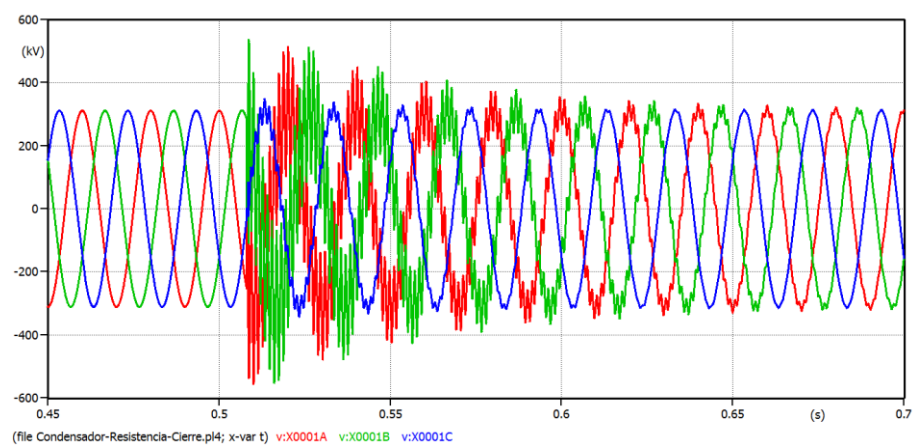
Gráfica 11. Corriente en el lado del banco de condensadores en la simulación 5

### 7.1.3. Simulación 9

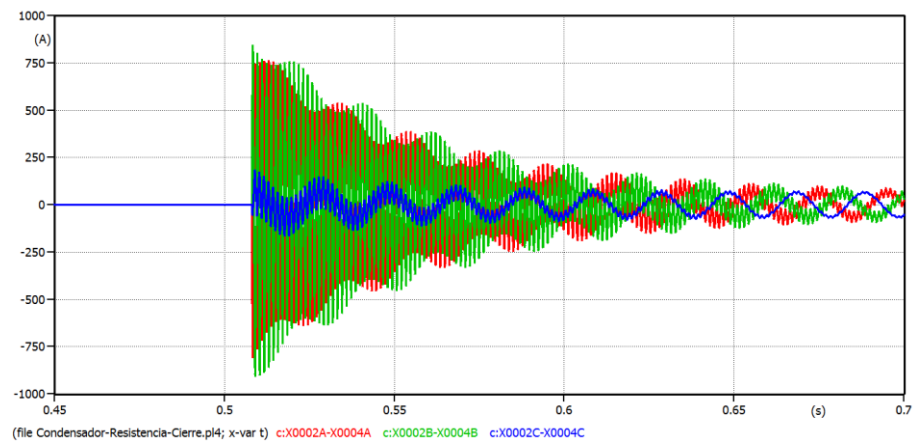
En las gráficas siguientes se observan los transitorios surgidos al realizar el cierre de forma simultánea en el segundo 0,508.



Gráfica 12. Tensión en el lado del banco de condensadores en la simulación 9



Gráfica 13. Tensión en el lado de la red en la simulación 9



Gráfica 14. Corriente en el lado del banco de condensadores en la simulación 9

#### 7.1.4. Conclusión

Como se puede observar, el punto óptimo para realizar el cierre de los interruptores se encuentra cuando la tensión en la fase es cero, el cual es el momento donde menos transitorios se generan al proceder con el cierre de los interruptores.

A su vez, al realizar el cierre cuando la tensión es cero y siendo una carga capacitiva, la corriente se encuentra en un máximo de la misma fase.

Por lo que en el Capítulo 8.1 se representa la solución a dichos transitorios y se procederá a cerrar los interruptores en dicho momento.

## 7.2. Simulación de apertura simultánea de una carga capacitiva

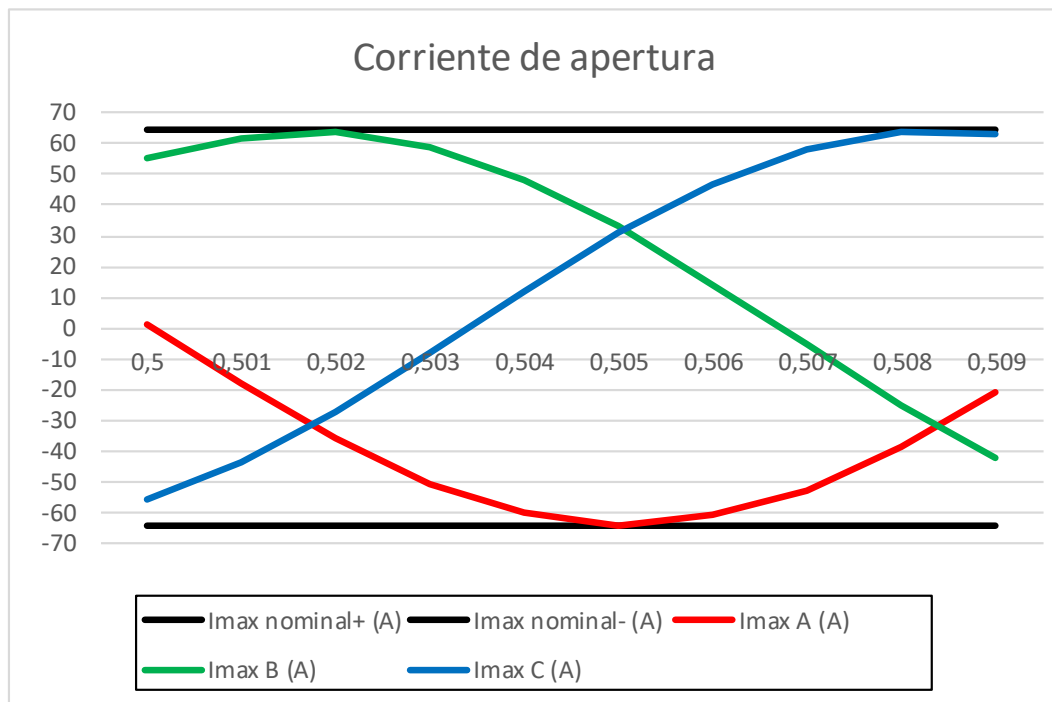
Al realizar la apertura simultánea de los interruptores se observa que los interruptores siguen dejando pasar la corriente y no elimina el arco que se produce hasta que la corriente pasa por 0, por lo que se produce un arco en el interruptor.

En las gráficas se muestran los valores de la corriente al producir la apertura del interruptor y el tiempo que tarda en aislar la reactancia.

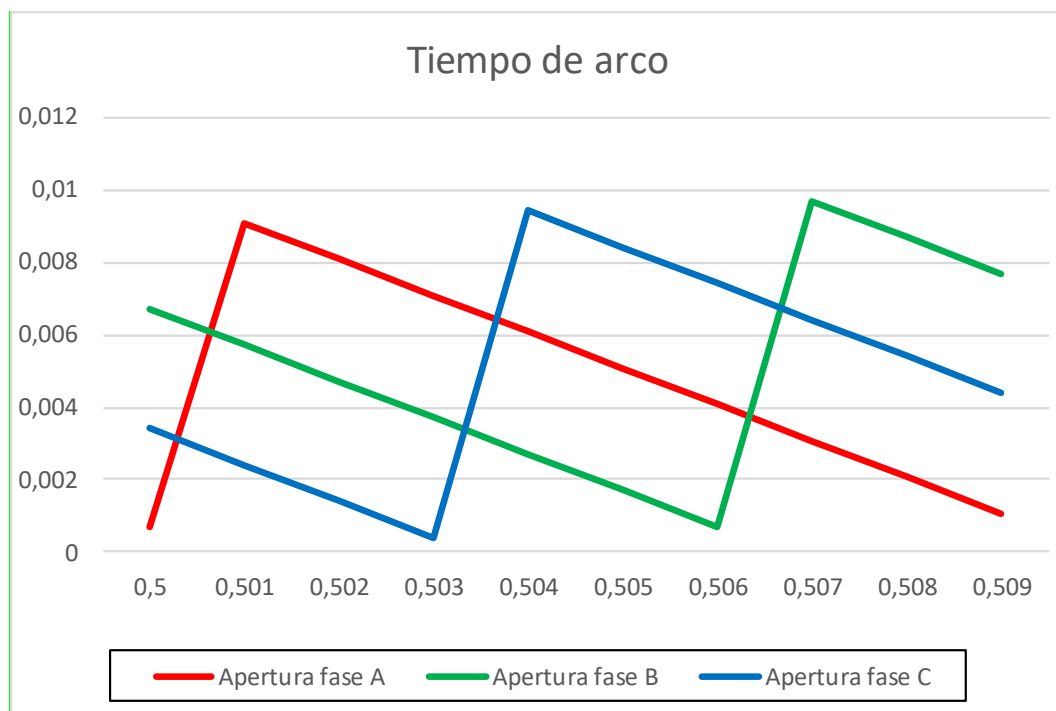
Los resultados obtenidos de las diez simulaciones se observan en la Tabla 7 y se observan en la Gráfica 15 y Gráfica 16.

Tiempos de apertura (s)				Corriente en el apertura (A)			Tiempo en el apertura		
Simulaciones	A	B	C	I <sub>max</sub> A	I <sub>max</sub> B	I <sub>max</sub> C	Apertura fase A	Apertura fase B	Apertura fase C
1	0,5	0,5	0,5	1	55	-56	0,0007	0,0067	0,0034
2	0,501	0,501	0,501	-18	62	-44	0,00907	0,0057	0,0024
3	0,502	0,502	0,502	-36	64	-27	0,00807	0,0047	0,0014
4	0,503	0,503	0,503	-51	59	-8	0,00707	0,0037	0,0004
5	0,504	0,504	0,504	-60	48	12	0,00607	0,0027	0,0094
6	0,505	0,505	0,505	-64	33	31	0,00507	0,0017	0,0084
7	0,506	0,506	0,506	-61	14	47	0,00407	0,0007	0,0074
8	0,507	0,507	0,507	-53	-5	58	0,00307	0,0097	0,0064
9	0,508	0,508	0,508	-39	-25	64	0,00207	0,0087	0,0054
10	0,509	0,509	0,509	-21	-42	63	0,00107	0,0077	0,0044

Tabla 7. Resultados de la simulaciones realizadas en el punto de apertura con un banco de condensadores



Gráfica 15. Valores de la intensidad de la Tabla 7



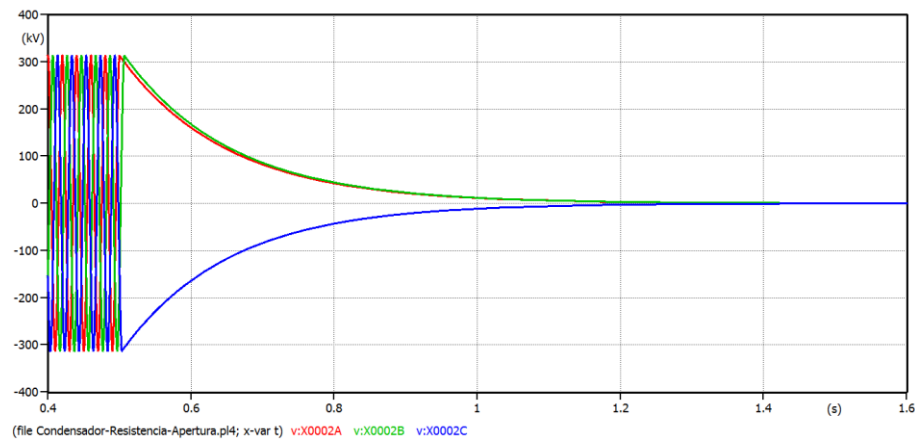
Gráfica 16. Valores de tiempo de arco hasta la apertura del interruptor

A continuación se observa una de las simulaciones realizadas para obtener los datos anteriormente expuestos.

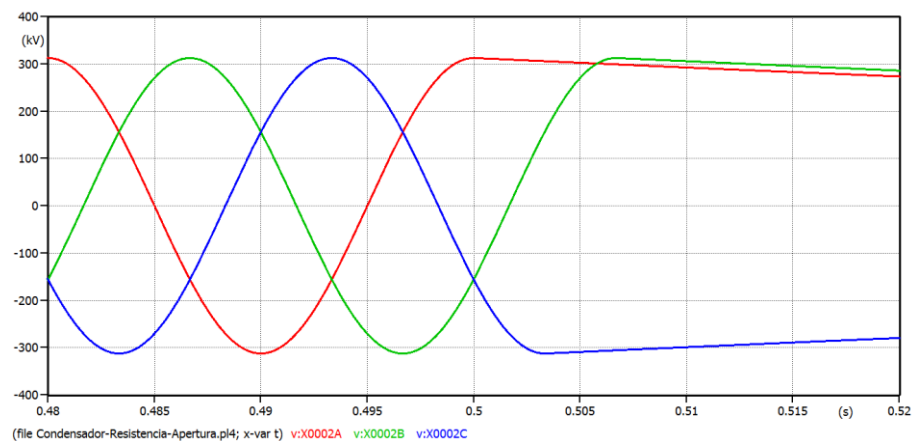
### 7.2.1. Simulación 1

En la gráfica siguiente se observan la descarga del condensador (Gráfica 17) y que la apertura de los interruptores se produce al llegar la intensidad a cero no cuando se le manda la orden de apertura.

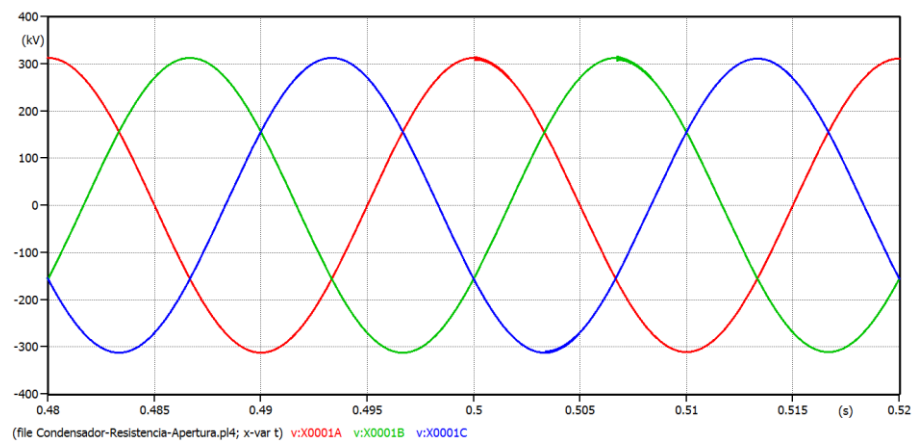
Esta simulación se realiza en el segundo 0,5 y no se elimina la falta hasta el segundo 0,5067.



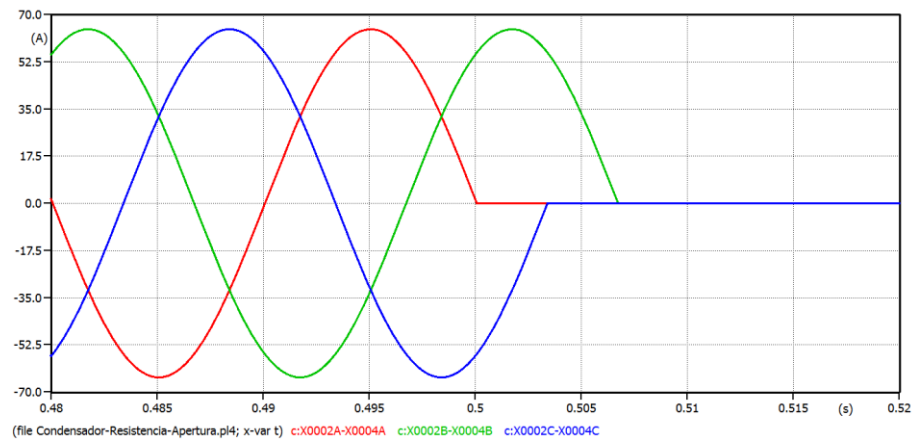
*Gráfica 17. Tensión de descarga del banco de condensadores en la simulación 1*



*Gráfica 18. Tensión en el lado del banco de condensadores en la simulación 1*



*Gráfica 19. Tensión en el lado de la red en la simulación 1*



Gráfica 20. Corriente en el lado del banco de condensadores en la simulación 1

### 7.2.2. Conclusión

En las simulaciones realizadas, se observa que la orden de apertura finaliza cuando la corriente pasa por su valor cero. Lo que nos conlleva a deducir que este es el momento preciso para realizar la apertura de los interruptores y así eliminar el arco que se produce.

### 7.3. Simulación de cierre simultánea de una carga inductiva

Al realizar el cierre simultáneo de los interruptores se observa unos transitorios elevados en la corriente, lo que puede conllevar a fallos en el sistema.

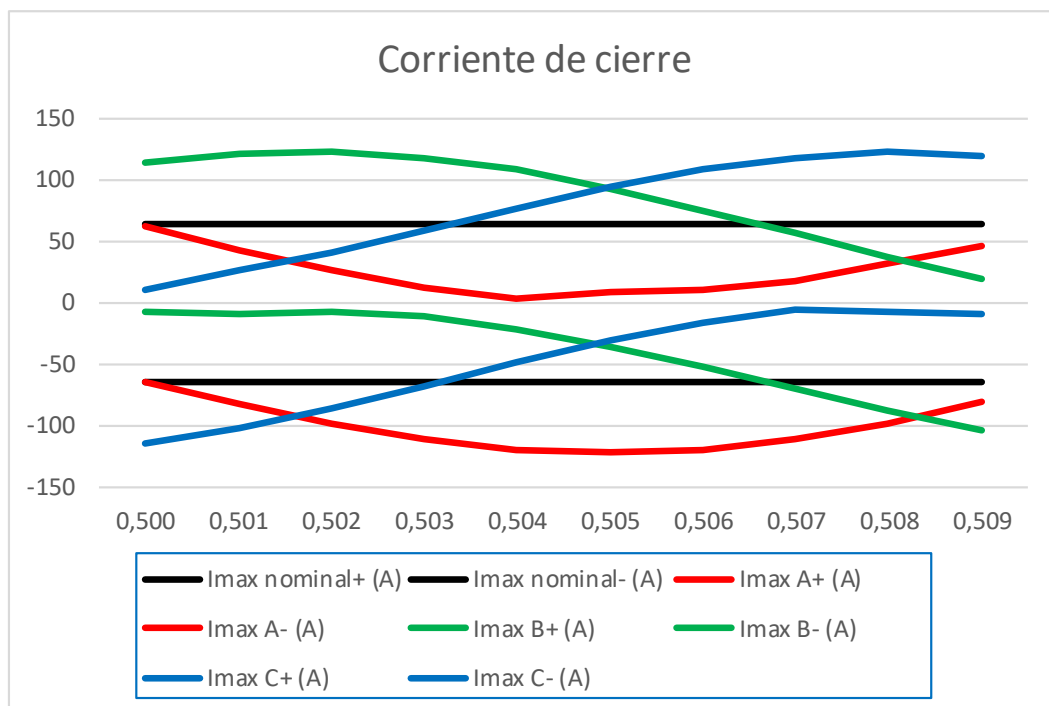
En la gráfica también se muestra el valor de pico que alcanza la onda de corriente y tensión de fase en régimen permanente, como referencia de los valores máximos de corriente y tensión se producen al realizar el cierre de los interruptores.

Los resultados obtenidos de las diez simulaciones se observan en la Tabla 8 y están graficados en la Gráfica 21 y Gráfica 22.

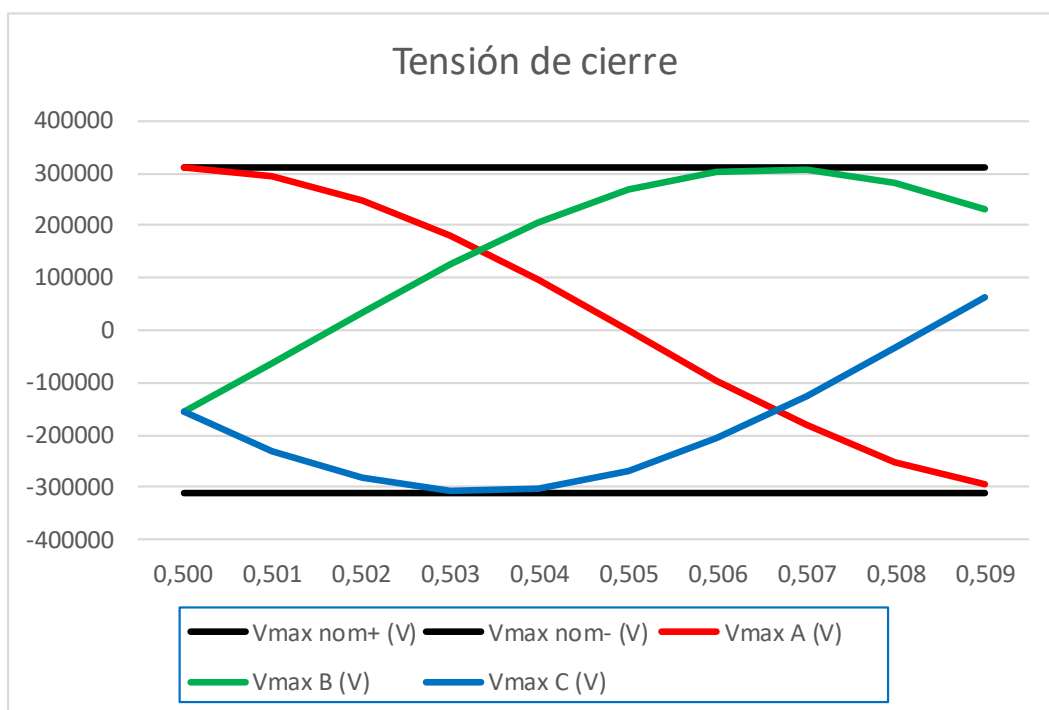
Tiempos de cierre (s)				Corriente en el cierre (A)						Tensión en el cierre (V)		
Simulaciones	A	B	C	I <sub>max</sub> A+	I <sub>max</sub> A-	I <sub>max</sub> B+	I <sub>max</sub> B-	I <sub>max</sub> C+	I <sub>max</sub> C-	V <sub>max</sub> A	V <sub>max</sub> B	V <sub>max</sub> C
1	0,5	0,5	0,5	62	-65	115	-8	10	-115	310150	-154820	-155330
2	0,501	0,501	0,501	43	-83	122	-9	26	-103	294820	-64007	-230810
3	0,502	0,502	0,502	26	-99	123	-8	41	-86	250110	32524	-282640
4	0,503	0,503	0,503	12	-112	118	-12	59	-69	181740	126770	-308510
5	0,504	0,504	0,504	3	-120	108	-22	77	-49	95377	207890	-303270
6	0,505	0,505	0,505	8	-123	93	-36	94	-31	-194,27	267960	-267760
7	0,506	0,506	0,506	10	-120	75	-53	108	-16	-96119	303430	-207310
8	0,507	0,507	0,507	18	-112	56	-71	118	-5	-182540	308420	-125880
9	0,508	0,508	0,508	31	-98	37	-88	123	-8	-251310	283050	-31741

10	0,509	0,509	0,509	47	-81	20	-104	120	-9	-294350	229470	64880
----	-------	-------	-------	----	-----	----	------	-----	----	---------	--------	-------

Tabla 8. Resultados de la simulaciones realizadas en el punto de cierre con un banco de inductancias



Gráfica 21. Valores de la intensidad de la Tabla 8



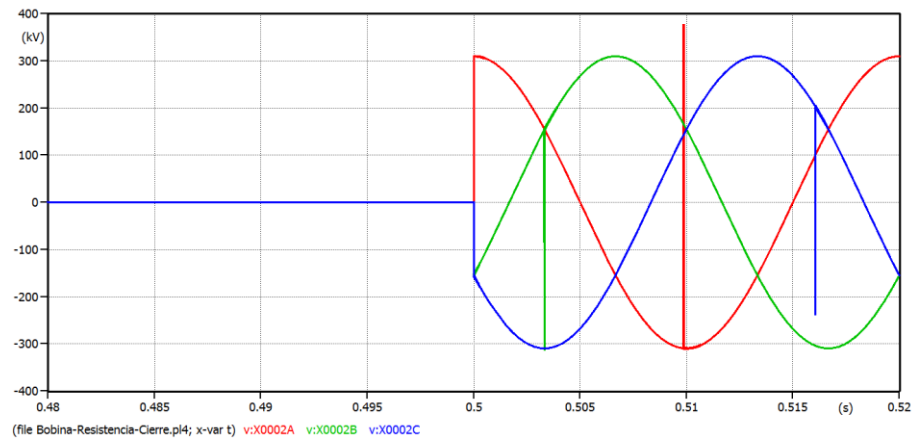
Gráfica 22. Valores de la tensión de la Tabla 8

A continuación se observan algunas de las simulaciones realizadas para obtener los datos anteriormente expuestos.

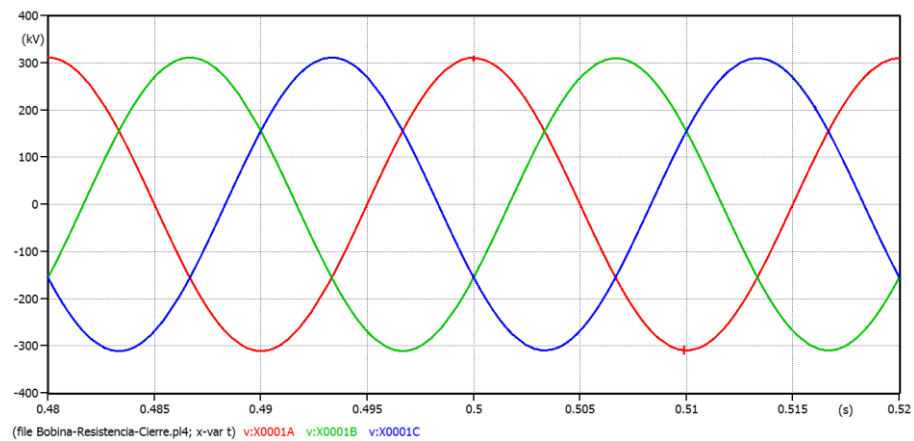


### 7.3.1. Simulación 1

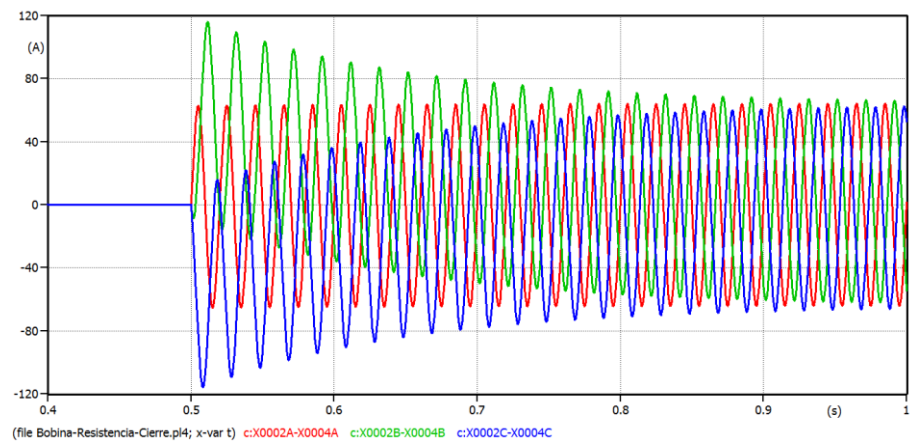
En las gráficas siguientes se observan la onda surgida del cierre de los interruptores de forma simultánea en el segundo 0,5.



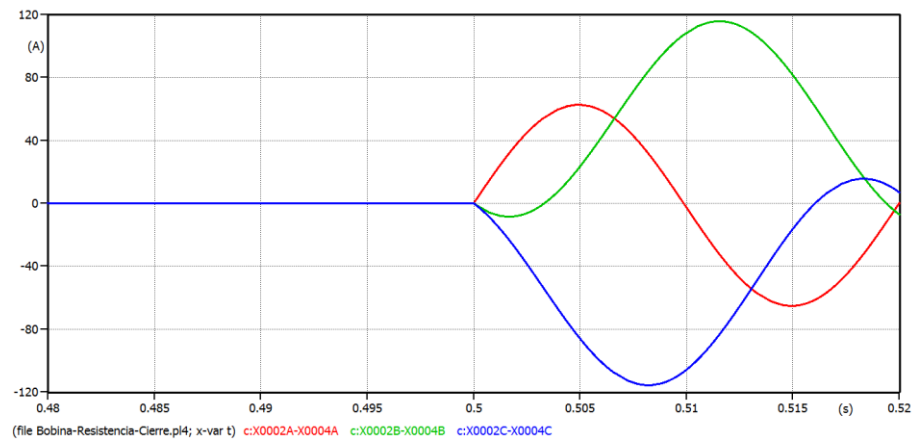
Gráfica 23. Tensión en el lado de la carga inductiva en la simulación 1



Gráfica 24. Tensión en el lado de la red en la simulación 1



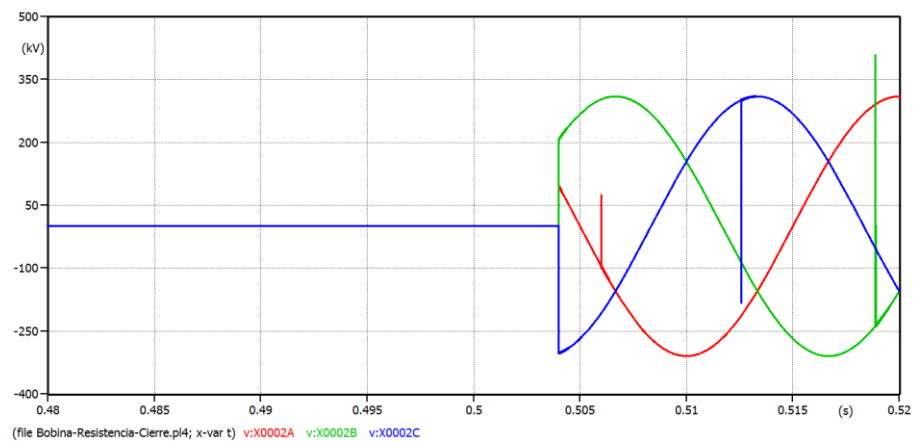
Gráfica 25. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 1



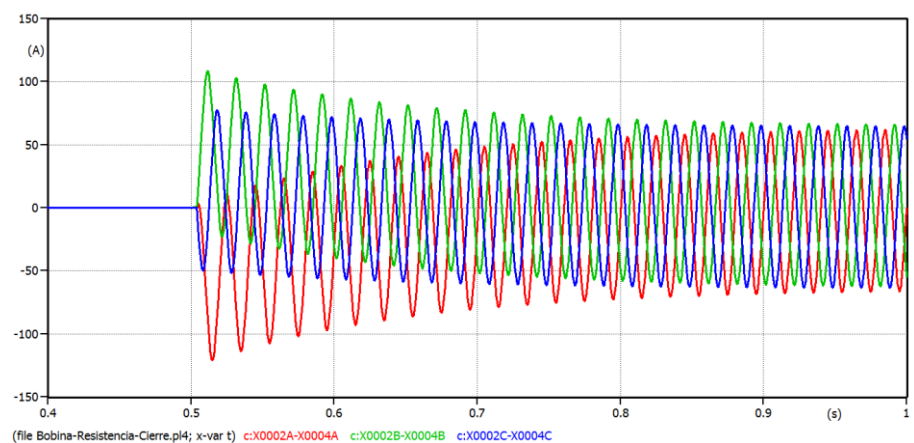
Gráfica 26. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 1(II)

### 7.3.2. Simulación 5

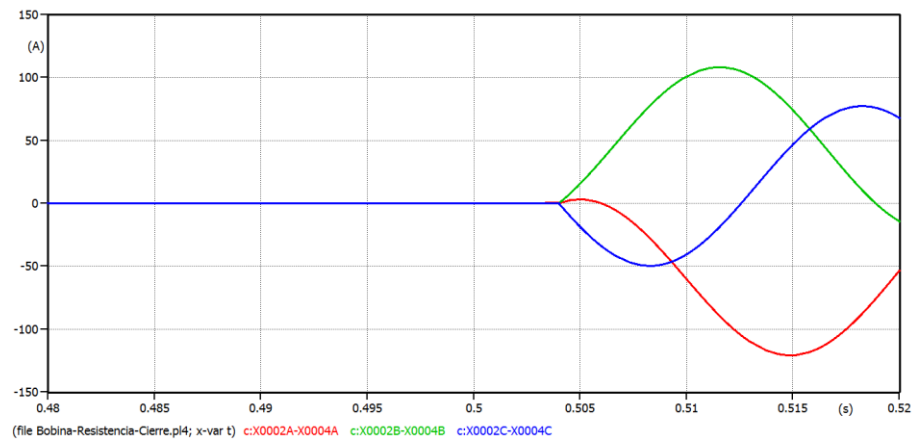
En las gráficas siguientes se observan la onda surgida del cierre de los interruptores de forma simultánea en el segundo 0,504.



Gráfica 27. Tensión en el lado de la carga inductiva en la simulación 5



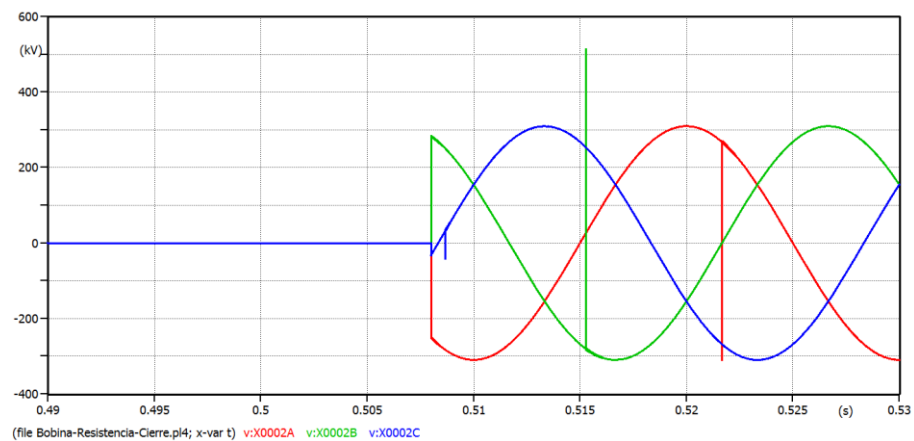
Gráfica 28. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 5



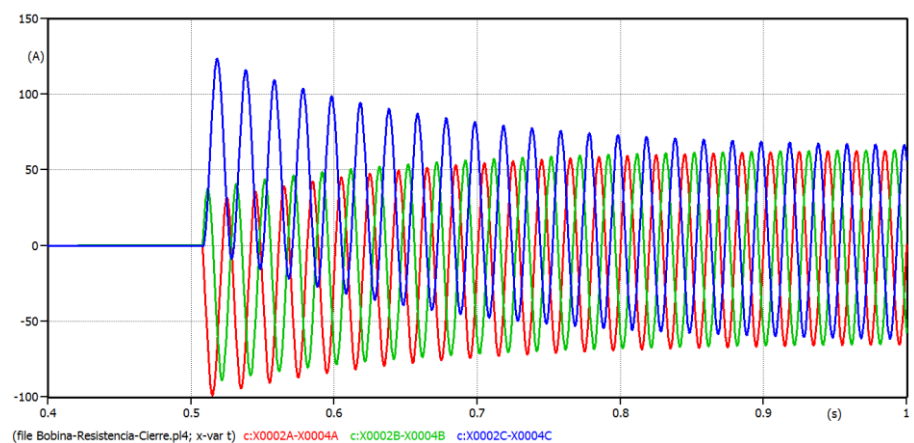
Gráfica 29. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 5 (II)

### 7.3.3. Simulación 9

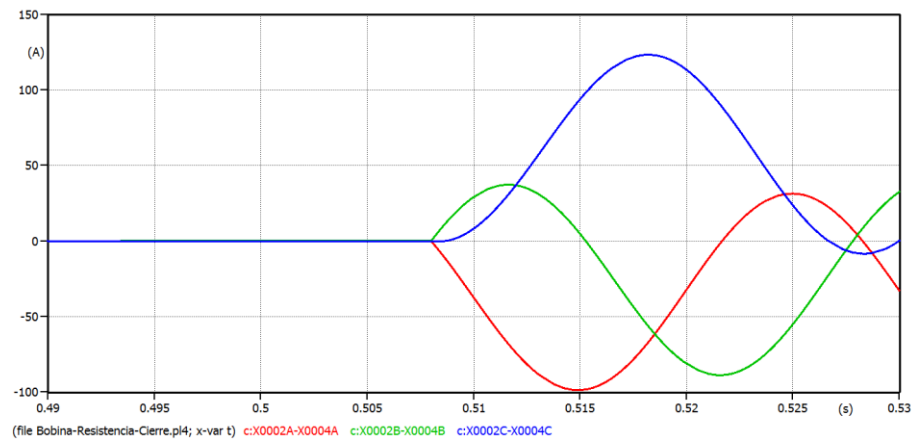
En las gráficas siguientes se observan la onda surgida del cierre de los interruptores de forma simultánea en el segundo 0,508.



Gráfica 30. Tensión en el lado de la carga inductiva en la simulación 9



Gráfica 31. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 9



Gráfica 32. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 9 (II)

### 7.3.4. Conclusión

Para el cierre de los interruptores en cargas inductivas, el momento óptimo se realiza en el punto donde la tensión es máxima y los transitorios son mínimos o nulos. Cuanto más te alejas de la tensión máxima más aumentan los transitorios, por lo que el punto más desfavorable es el paso de la tensión por el valor máximo. Puede provocar valores pico de intensidad hasta dos veces la corriente nominal.

### 7.4. Simulación de apertura simultánea de una carga inductiva

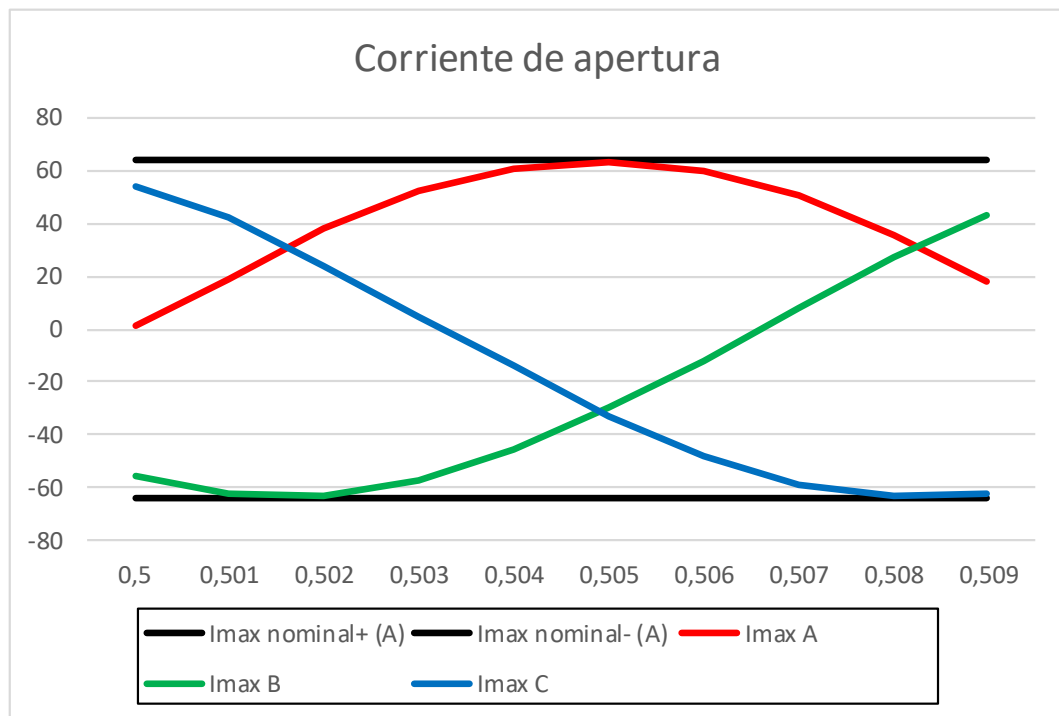
Al realizar la apertura simultánea de los interruptores se observa el mismo proceso explicado en el apartado 7.2, que dice que el arco no se elimina hasta el paso por cero de la corriente

En las gráficas siguientes se muestran los valores de la corriente al producir la apertura del interruptor y el tiempo que tarda en aislar la falta.

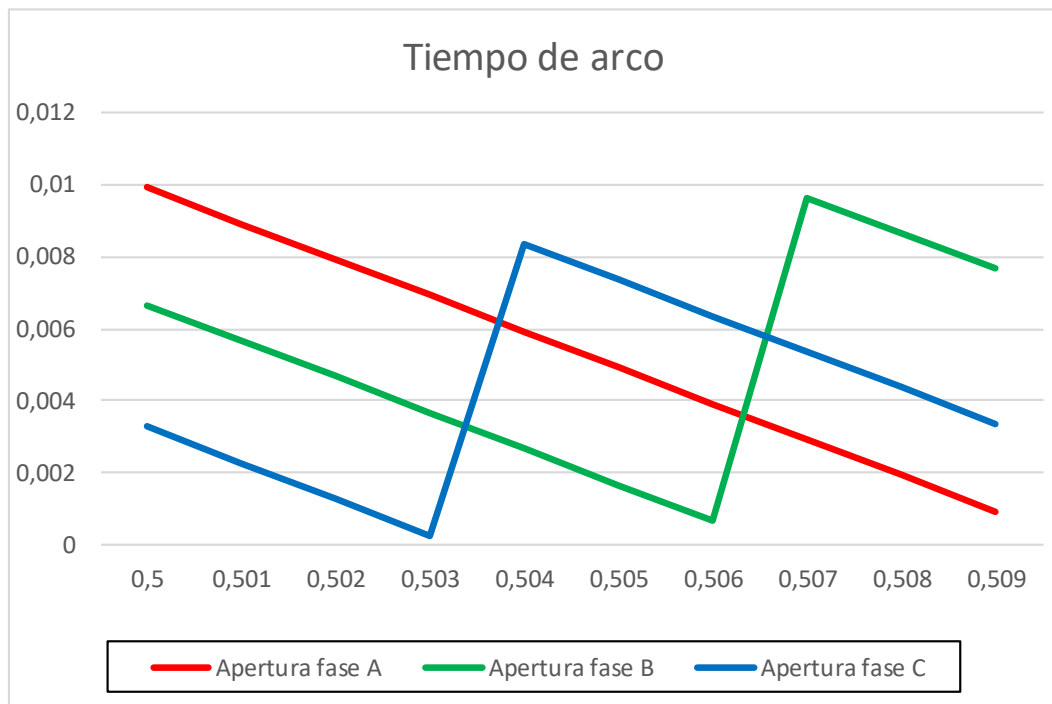
Los resultados obtenidos de las diez simulaciones se observan en la Tabla 9.

Tiempos de apertura (s)				Corriente en el apertura (A)			Tiempo en el apertura (seg)		
Simulaciones	Fase A	Fase B	Fase C	I <sub>max</sub> A	I <sub>max</sub> B	I <sub>max</sub> C	Apertura fase A	Apertura fase B	Apertura fase C
1	0,5	0,5	0,5	1	-56	54	0,00993	0,00667	0,00327
2	0,501	0,501	0,501	19	-62	42	0,00893	0,00567	0,00227
3	0,502	0,502	0,502	38	-63	24	0,00793	0,00467	0,00127
4	0,503	0,503	0,503	52	-57	5	0,00693	0,00367	0,00027
5	0,504	0,504	0,504	61	-46	-14	0,00593	0,00267	0,00837
6	0,505	0,505	0,505	63	-30	-33	0,00493	0,00167	0,00737
7	0,506	0,506	0,506	60	-12	-48	0,00393	0,00067	0,00637
8	0,507	0,507	0,507	51	8	-59	0,00293	0,00967	0,00537
9	0,508	0,508	0,508	36	27	-63	0,00193	0,00867	0,00437
10	0,509	0,509	0,509	18	43	-62	0,00093	0,00767	0,00337

Tabla 9. Resultados de las simulaciones realizadas en el punto de apertura con un banco de inductancias



Gráfica 33. Valores de la intensidad de la Tabla 9



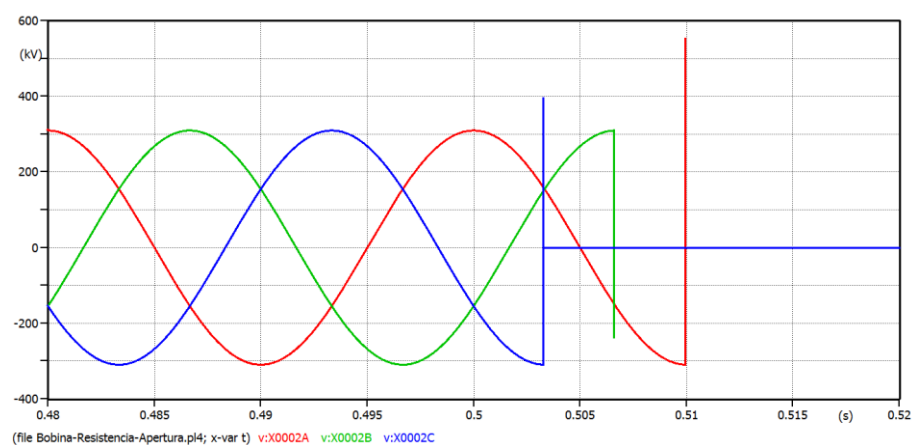
Gráfica 34. Valores de tiempo de arco hasta la apertura del interruptor

A continuación se observan unas de las simulaciones realizadas para obtener los datos anteriormente expuestos.

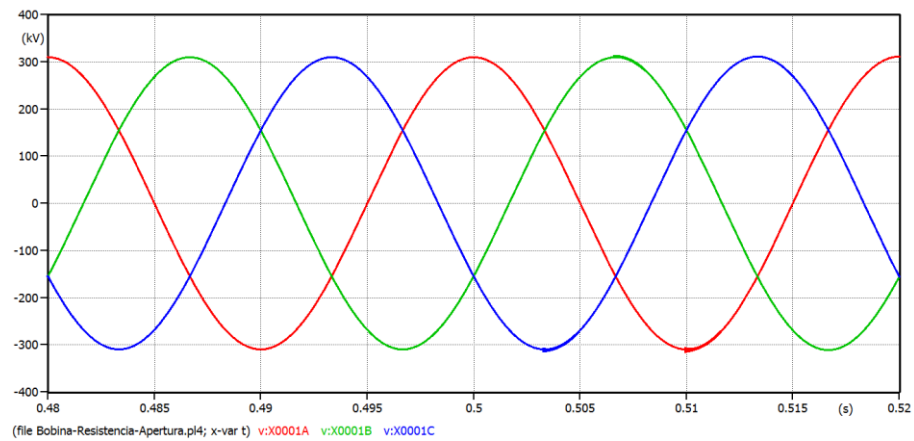
#### 7.4.1. Simulación 1

La apertura de los interruptores se produce al llegar la intensidad a cero no cuando se le manda la orden de apertura.

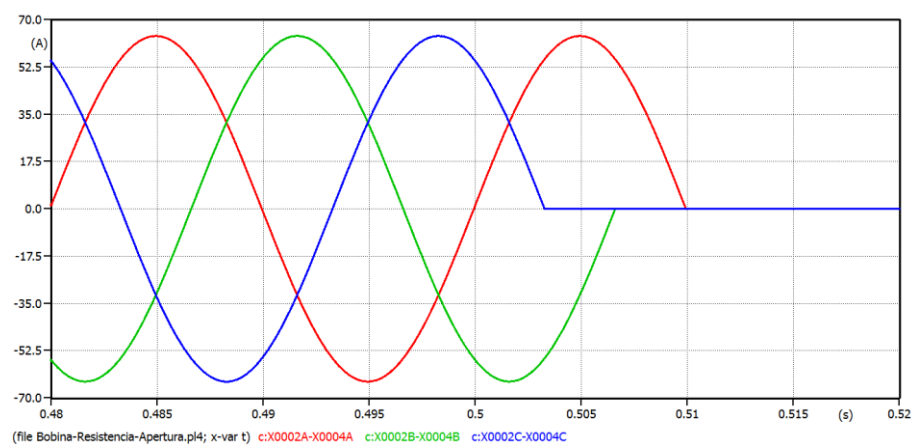
Esta simulación se realiza en el segundo 0,5 y no se elimina la falta hasta el segundo 0,5067.



Gráfica 35. Tensión en el lado de la carga inductiva en la simulación 1



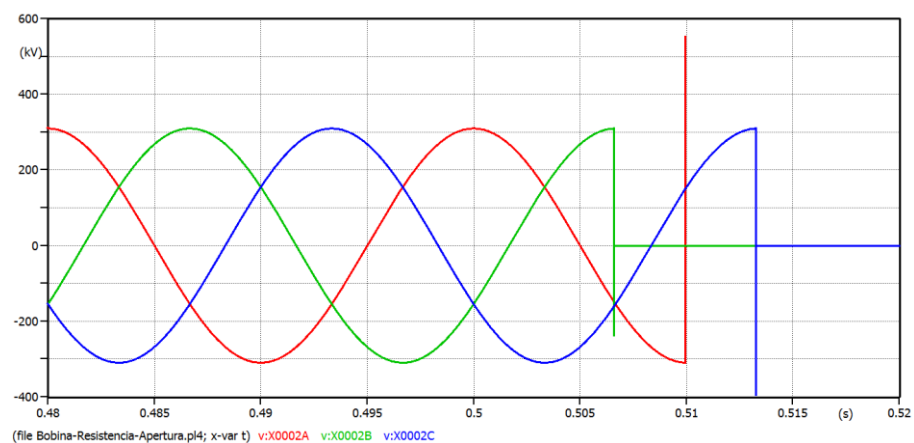
Gráfica 36. Tensión en el lado de la red en la simulación 1



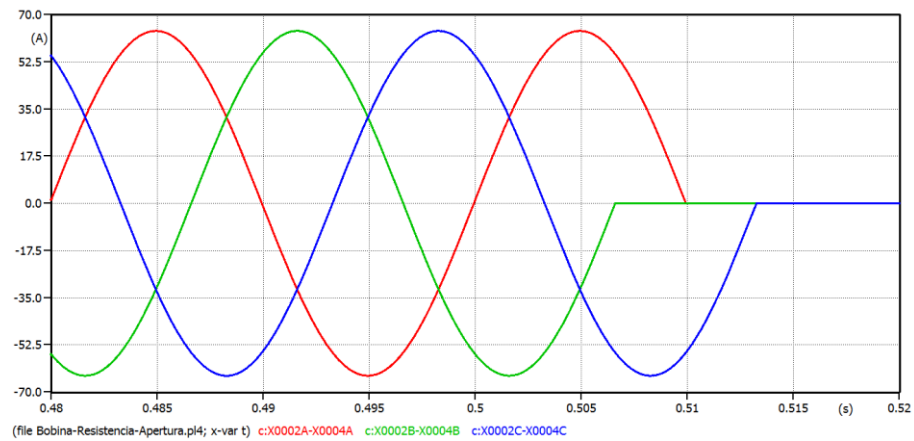
Gráfica 37. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 1

## 7.4.2. Simulación 5

Esta simulación se realiza en el segundo 0,504 y no se elimina la falta hasta el segundo 0,5123.



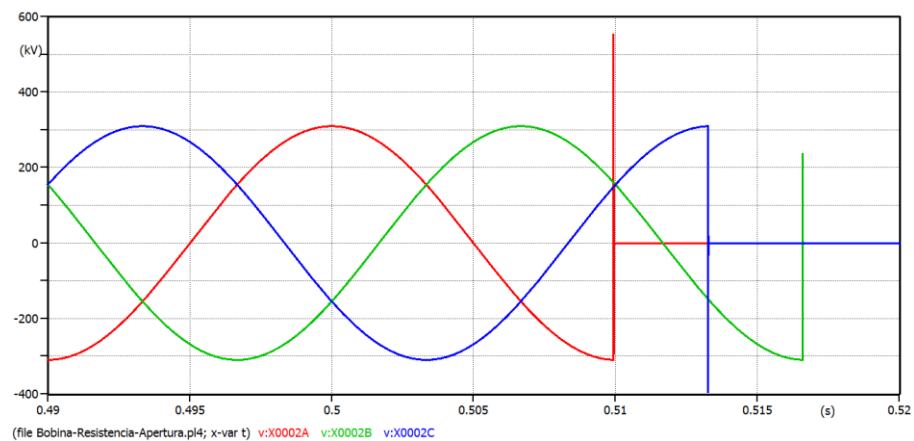
Gráfica 38. Tensión en el lado de la carga inductiva en la simulación 5



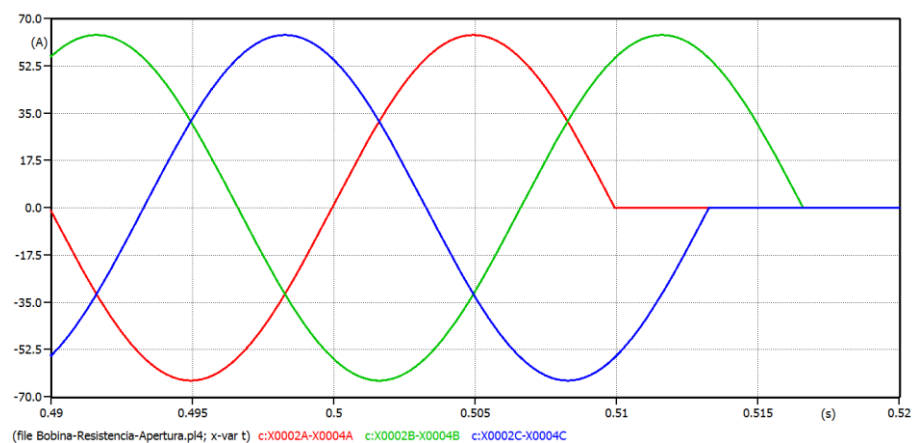
Gráfica 39. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 5

### 7.4.3. Simulación 9

Esta simulación se realiza en el segundo 0,508 y no se elimina la falta hasta el segundo 0,5167.



Gráfica 40. Tensión en el lado de la carga inductiva en la simulación 9



Gráfica 41. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 9



#### 7.4.4. Conclusión

Después de realizar las simulaciones, se observa que la apertura óptima de los interruptores con cargas inductivas se realiza en el punto donde la corriente sea cero y los transitorios son mínimos o nulos, siendo el mismo momento que en el apartado 7.2. Cuanto más te alejas más aumentan los transitorios.

### 8. Maniobra controlada

La maniobra controlada se considera un método de control de sobretensiones.

El control de sobretensiones de maniobra se realiza mediante la sincronización de la operación de apertura y cierre del interruptor en el punto de voltaje cero, para así eliminar los transitorios.

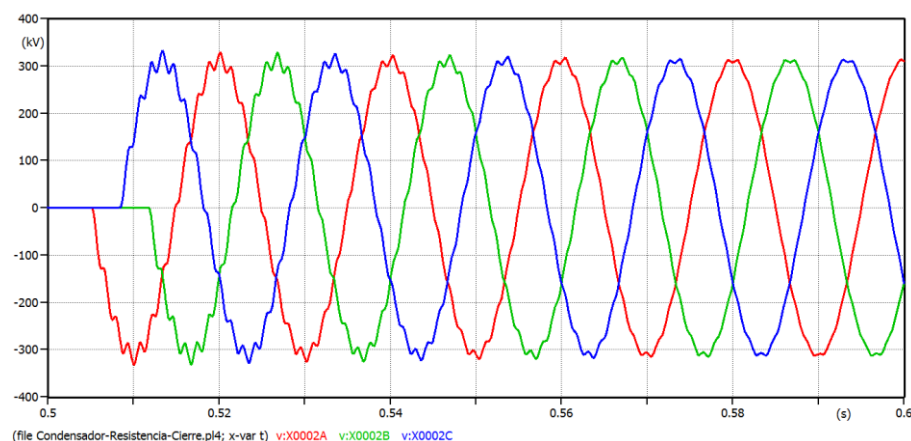
#### 8.1. Simulación de maniobra controlada de cierre de una carga capacitiva

Vamos a realizar la simulación del cierre de controlado de los interruptores de una carga capacitiva. Como dijimos en el capítulo 7.1, el momento más favorable para realizar el cierre de los interruptores se encuentra en el momento que la tensión de la red pasa por cero (corriente máxima), como vamos a ver a continuación. En nuestra simulación, el momento en el cual tiene que cerrar el interruptor es:

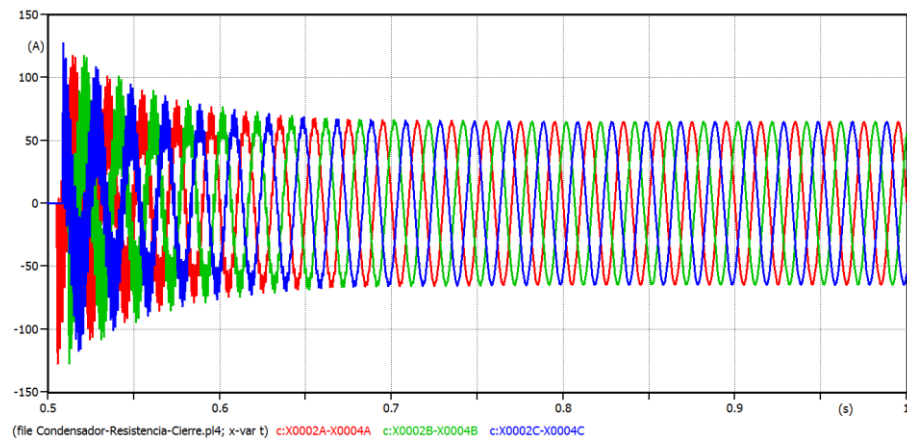
Fase A (s)	Fase B (s)	Fase C (s)
0,505	0, 5083333	0, 5116667

Tabla 10. Tiempos de cierre de los interruptores

Tras realizar la simulación, obtenemos las siguientes graficas:

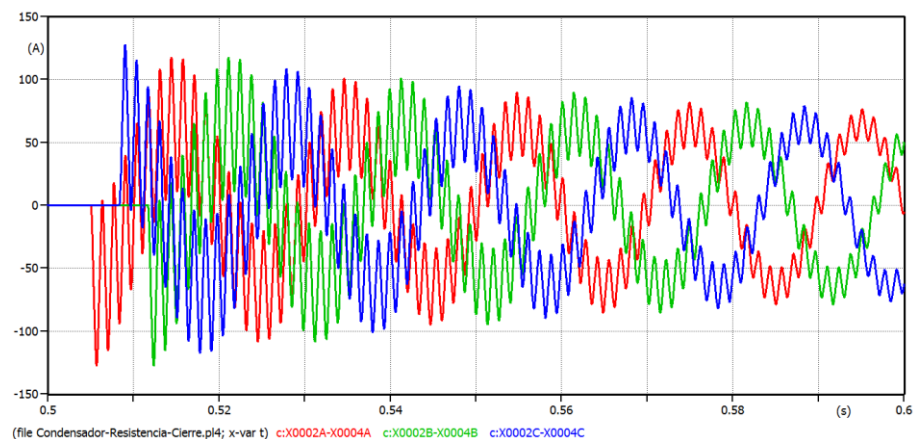


Gráfica 42. Tensión en el lado del banco de condensadores con maniobra controlada



Gráfica 43. Corriente en el lado del banco de condensadores con maniobra controlada I

En la Gráfica 43 se observa el tiempo de inestabilidad producido en la maniobra de cierre, pero siendo la mínima inestabilidad posible sin realizar ninguna modificación en el esquema inicial.



Gráfica 44. Corriente en el lado del banco de condensadores con maniobra controlada II

En este momento también se ven unos pequeños transitorios, por lo que hemos colocado batería una resistencia en serie al condensador para eliminar dicho transitorio y que la onda sinusoidal sea lo más idéntica a la de la red.

Tras varias simulaciones colocando diferentes resistencias en serie, observamos que el valor de la resistencia que nos da un  $\tau = 0.0015$ .

Por lo cual, dichas resistencias se puede hallar de la siguiente manera. Usando la formula  $R = \frac{\tau}{5 \cdot C}$ , obtenemos un valor de resistencia de 456,16  $\Omega$ .

$$R = \frac{\tau}{5 \cdot C} = \frac{0,0015}{5 \cdot 0,65766\mu}$$

Component: RLCY3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohm	456
L_1	mH	0
C_1	μF	0.65766
R_2	Ohm	456
L_2	mH	0
C_2	μF	0.65766
R_3	Ohm	456
L_3	mH	0

NODE	PHASE	NAME
IN	ABC	X0004
OUT	1	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output  
0 - No

☐ Hide  
☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Ilustración 8. Banco de condensadores modificado con resistencia en serie modelado en ATP

En la Ilustración 8 se observa la modificación realizada en el banco de condensadores, y en la Ilustración 9 el esquema modificado para la eliminación de transitorios.

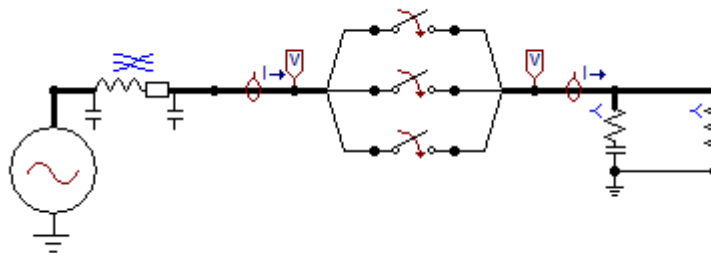
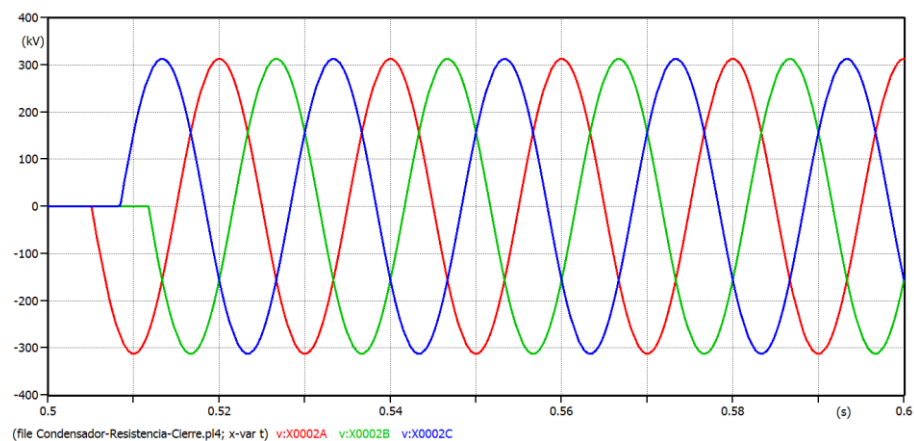
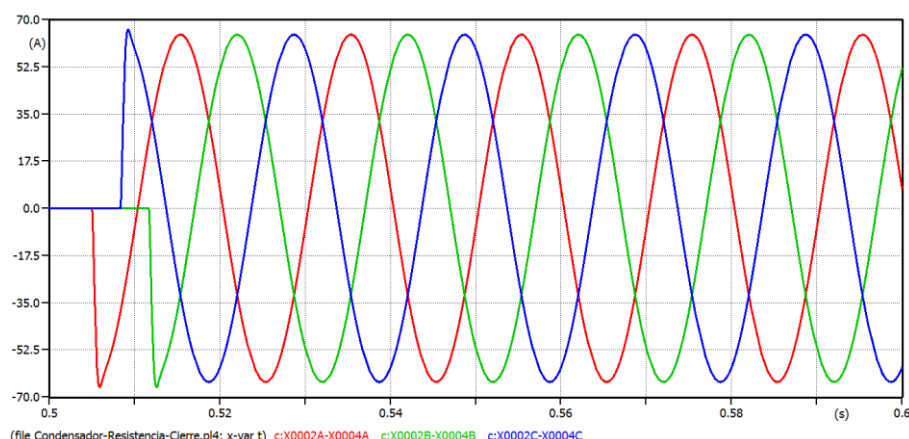


Ilustración 9. Esquema de la conexión de un banco de condensadores y resistencias en serie

Las simulaciones obtenidas con el esquema descrito anteriormente, muestran una onda sinusoidal casi perfecta.



Gráfica 45. Tensión en el lado del banco de condensadores con maniobra controlada y resistencias en serie



Gráfica 46. Corriente en el lado del banco de condensadores con maniobra controlada y resistencia en serie

### 8.1.1. Conclusión

Como se puede observar en las gráficas del apartado 8.1 al realizar el cierre de los interruptores de manera controlada se minimizan al máximo los transitorios generados, pero no se consiguen eliminar.

Para eliminar casi en su totalidad los transitorios es necesario introduce el banco de resistencias en serie al banco de condensadores el cual, consigue minimizar los transitorios hasta poder ser considerada una onda sinusoidal perfecta, como se observa en la Gráfica 45 y Gráfica 46.

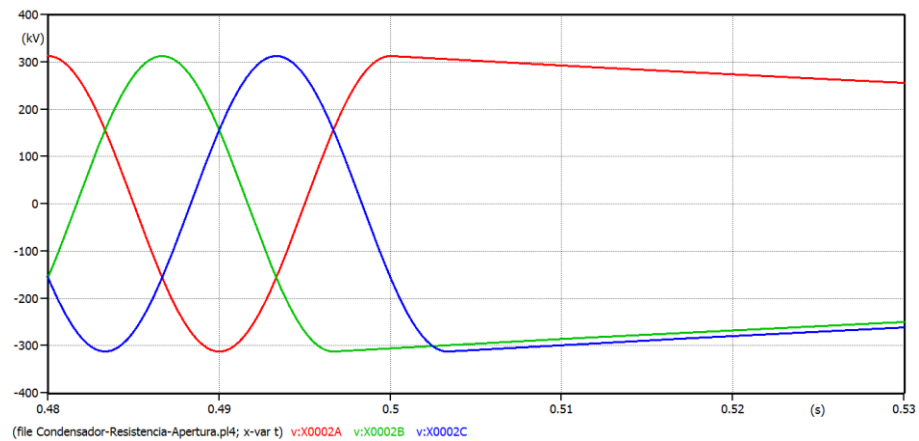
## 8.2. Simulación de maniobra controlada de apertura de una carga capacitiva

Vamos a realizar la simulación de la apertura controlada de los interruptores de una carga capacitiva. En el apartado 7.2 se explicó que el momento más favorable para la apertura de los interruptores de potencia se encuentra cuando la corriente pasa por cero. En nuestra simulación, el momento en el cual tiene que realizar la apertura el interruptor es:

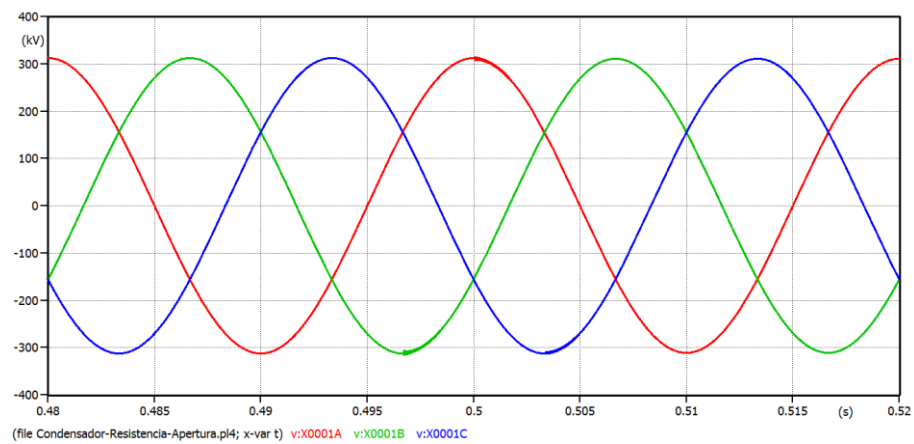
A	B	C
0,499	0,4965666	0,503233

Tabla 11. Tiempos de apertura de los interruptores

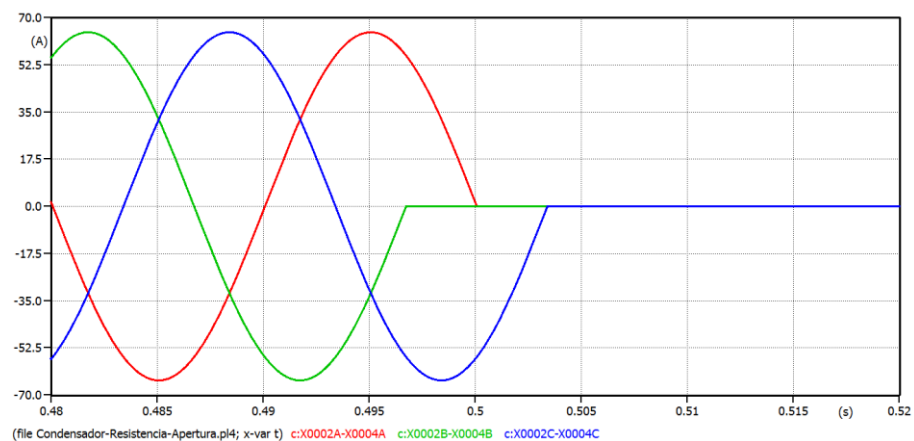
Después de realizar la simulación, las gráficas reproducidas por el programa ATPDraw son:



Gráfica 47. Tensión en el lado del banco de condensadores con maniobra controlada



Gráfica 48. Tensión en el lado de la red con maniobra controlada



Gráfica 49. Tensión en el lado del banco de condensadores con maniobra controlada

### 8.2.1. Conclusión

Como se puede observar en las gráficas anteriores al realizar la apertura de los interruptores de manera controlada se minimizan al máximo los transitorios generados, pero no se consiguen eliminar.

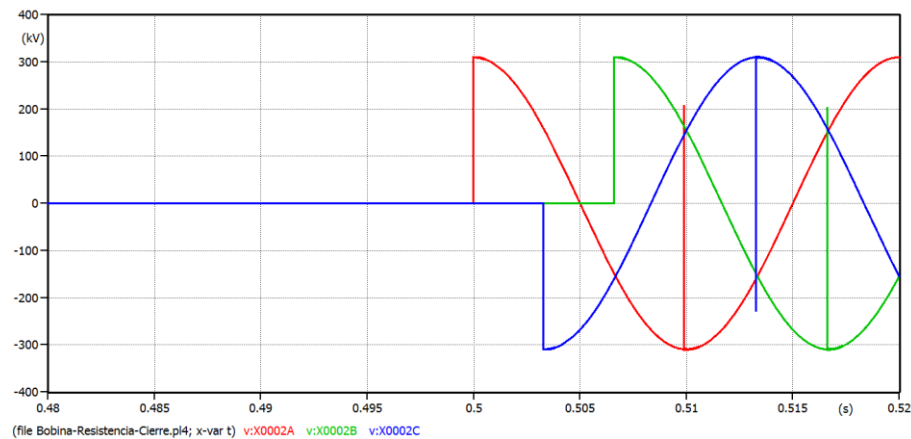
En las simulaciones realizadas, se observa que la orden de apertura finaliza cuando la corriente pasa por su valor cero, al realizar la orden de apertura en el momento que la corriente pasa por cero, el transitorio se disminuye al máximo. Lo que nos conlleva a deducir que este es el momento preciso para realizar la apertura de los interruptores, y así minimizar los daños en el sistema eléctrico.

### 8.3. Simulación de maniobra controlada de cierre de una carga inductiva

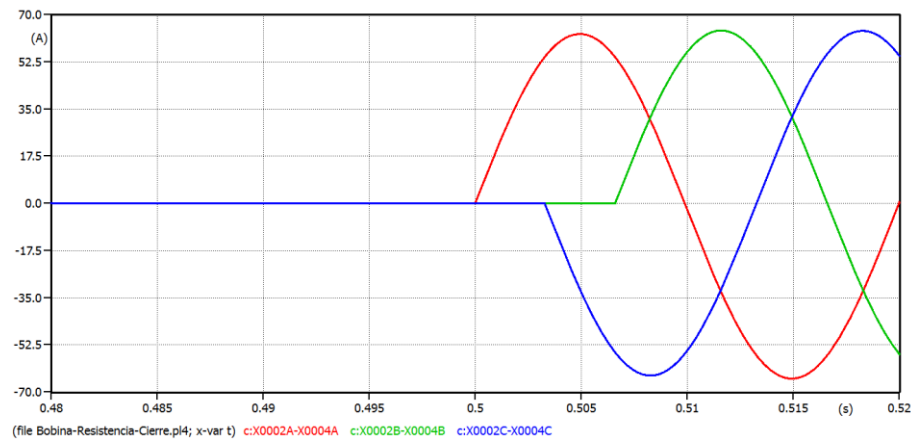
Vamos a realizar la simulación del cierre controla de los interruptores de una carga inductiva. Tras lo descrito en el apartado 7.3, el momento más favorable para realizar el cierre de los interruptores se encuentra en el momento que la tensión de la red pasa por un máximo (corriente cero), como vamos a ver a continuación. En nuestra simulación, el momento en el cual tiene que realizar el cierre el interruptor es:

A	B	C
0,49999	0,50659	0,5032665

Tabla 12. Tiempos de cierre de los interruptores



Gráfica 50. Tensión en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada



Gráfica 51. Corriente en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada

Como se puede observar en la Gráfica 50, existe una sobretensión cuando la corriente pasa por cero.

Igual que en el banco de condensadores, y tras varias simulaciones colocando diferentes resistencias en paralelo para eliminar dicha sobretensión, obtuvimos un valor de resistencia que nos da un  $\tau = 0,0015$

Con lo que, el valor de la resistencia obtenida usando la formula  $R = \frac{5 \cdot L}{\tau}$  es de 51.353,99

$$R = \frac{5 \cdot L}{\tau} = \frac{5 \cdot 15,40619\text{m}}{0,00006}$$

Component: RLCY3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohm	51354
L_1	mH	0
C_1	µF	0
R_2	Ohm	51354
L_2	mH	0
C_2	µF	0
R_3	Ohm	51354
L_3	mH	0

NODE	PHASE	NAME
IN	ABC	X0005
OUT	1	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No

Hide \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Ilustración 10. Carga inductiva modificado con resistencia en paralelo modelado en ATP

En el esquema (Ilustración 11) siguiente se muestra la modificación realizada para la eliminación de transitorios.

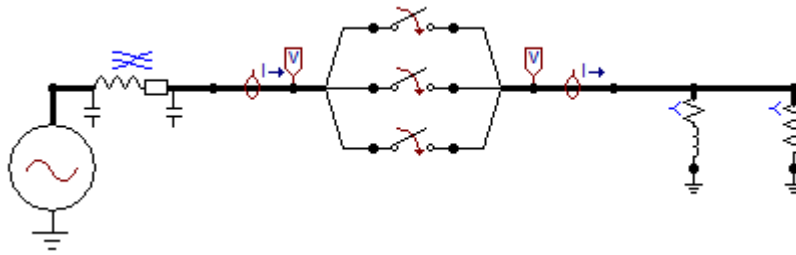
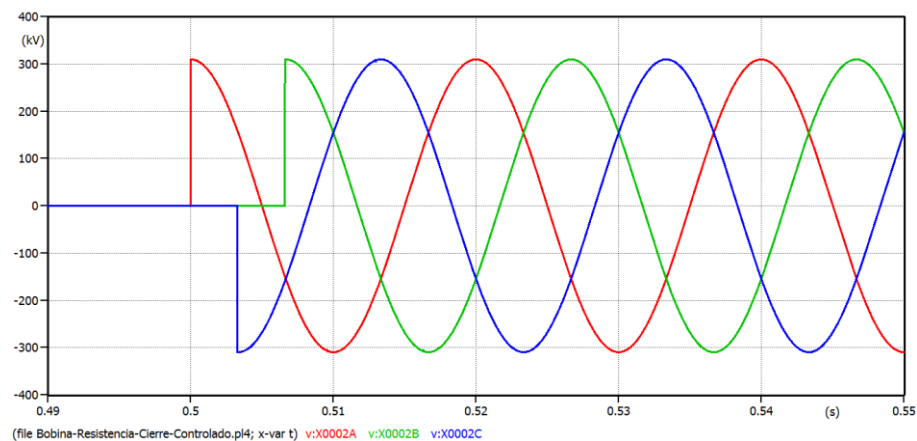
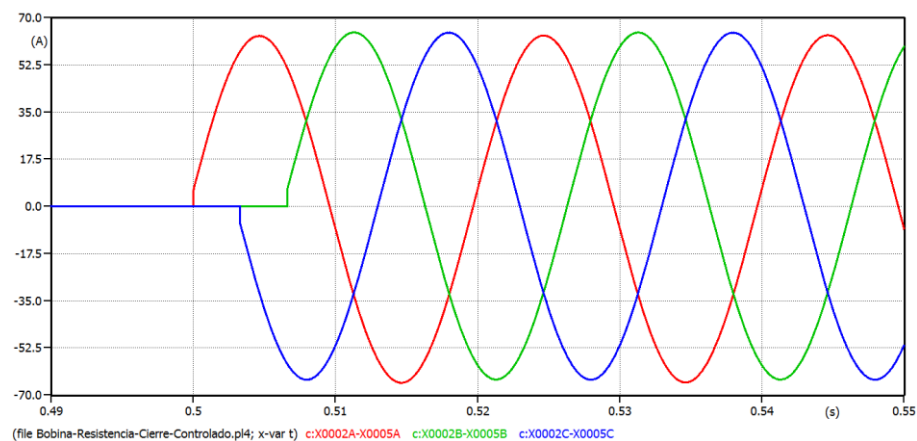


Ilustración 11. Esquema de la conexión de un reactor tipo shunt y resistencias en paralelo

Tras realizar las diferentes simulaciones, y con el banco de resistencia anteriormente descrito, las gráficas obtenidas son:



Gráfica 52. Tensión en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada y resistencias en paralelo



Gráfica 53. Corriente en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada y resistencia en paralelo

### 8.3.1. Conclusión

Como se observar en la Gráfica 50 y Gráfica 51 al realizar el cierre de los interruptores de manera controlada se minimizan al máximo los transitorios generados, pero no se consiguen eliminar en su totalidad.



Para la eliminación casi total de los transitorios es necesario introduce el banco de resistencias en paralelo al banco de inductancias, consiguiendo así minimizar los transitorios hasta poder ser considerada una onda sinusoidal perfecta, como se observa en la Gráfica 52 y Gráfica 53.

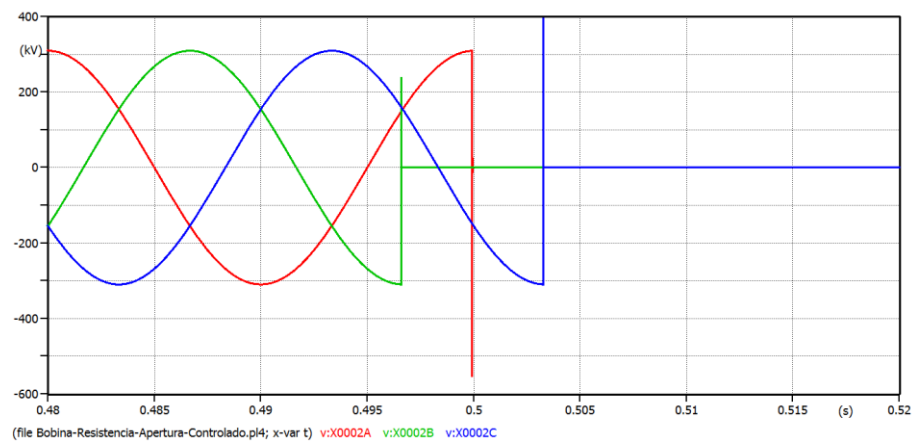
#### 8.4. Simulación de maniobra controlada de apertura de una carga inductiva

Para la simulación de la apertura controlada de los interruptores de una carga inductiva, el momento más correcto se encuentra en el instante que pasa la corriente por cero, como vamos a ver a continuación. El tiempo para la apertura del interruptor en nuestro simulador se encuentra:

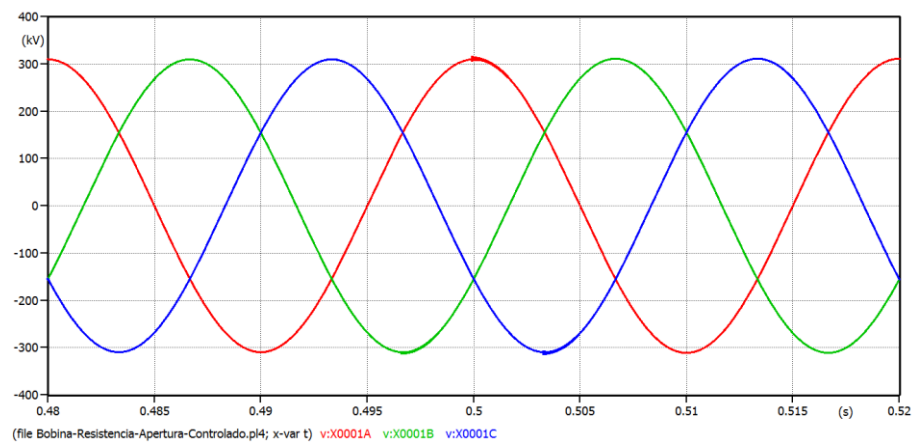
A	B	C
0,499	0,4965666	0,503233

Tabla 13. Tiempos de apertura de los interruptores

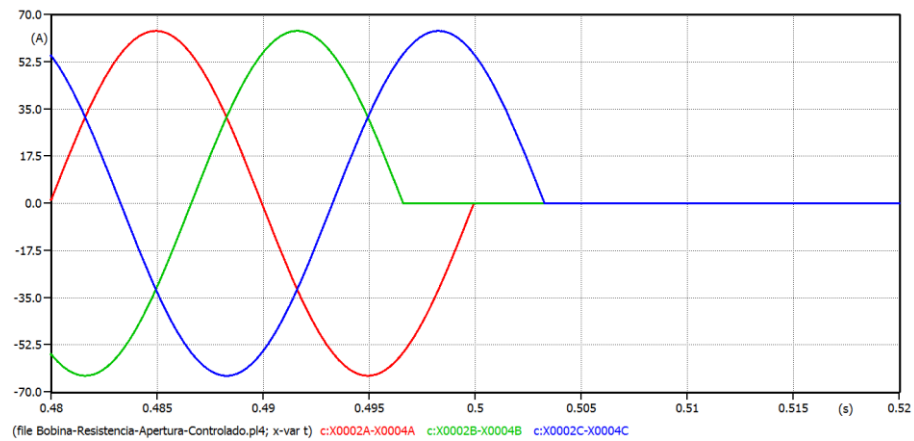
Las gráficas obtenidas en la simulación son:



Gráfica 54. Tensión en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada



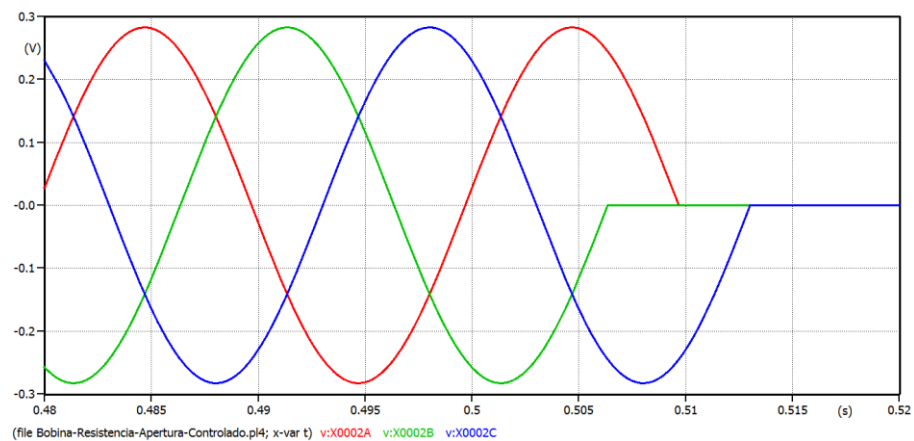
Gráfica 55. Tensión en el lado de la red con maniobra controlada



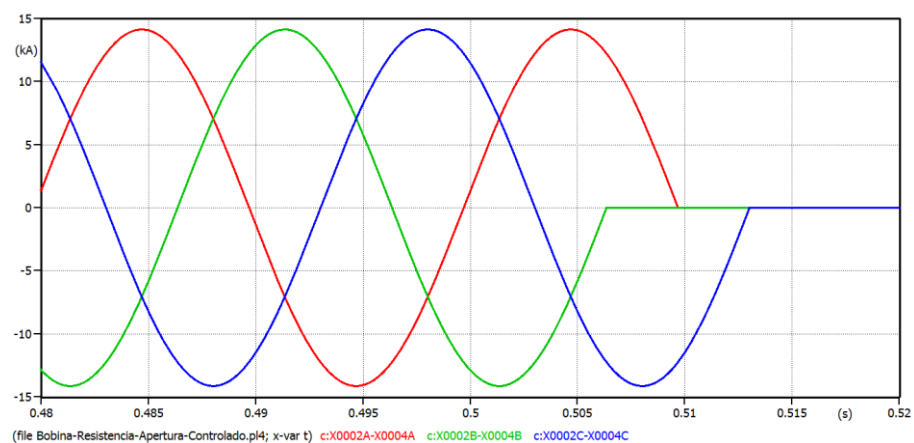
Gráfica 56. Corriente en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada

En la Gráfica 54 se observan unas sobretensiones, las cuales son eliminadas tras instalar la resistencia en paralelo descrita en el apartado 8.3.

Las simulaciones obtenidas tras realizar el cambio descrito, son



Gráfica 57. Tensión en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada y resistencia en paralelo



Gráfica 58. Corriente en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada y resistencia en paralelo

### **8.4.1. Conclusión**

Como se puede observar en las gráficas anteriores al realizar la apertura de los interruptores de manera controlada se minimizan al máximo los transitorios generados, pero sigue existiendo una sobretensión elevada.

En las simulaciones realizadas, se observa que la orden de apertura finaliza cuando la corriente pasa por su valor cero, igual que pasa en el apartado 8.2. Lo que nos conlleva a deducir que este es el momento preciso para realizar la apertura de los interruptores.

## **9. Conclusiones finales**

Para finalizar este Trabajo Fin de Grado, vamos a realizar las conclusiones obtenidas en el estudio que se ha llevado en las maniobras de apertura y cierre de los interruptores.

Como se ha podido observar en los apartados de cierre de los interruptores, el punto idóneo es el punto de máxima tensión, ya que este punto reduce los transitorios y las sobrecorrientes que se producen en el cierre.

Respecto a la apertura de los interruptores, el punto más favorable es el paso por cero de la corriente, ya que si no se realiza en ese punto, el interruptor no consigue aislar el arco hasta su próximo paso por cero, aunque todos los interruptores tienen una rigidez dieléctrica, por lo cual el interruptor consigue aislar el arco antes de su paso por cero, la cual hemos obviado en este Trabajo Fin de Grado.

Para llegar a realizar una extinción casi completa de los transitorios es necesario instalar diferentes elementos según la carga que esté conectada a la red.

En el caso de estar conectado a la red un banco de condensadores es necesario colocar una batería de resistencia en serie al banco, y en el caso de una carga inductiva es necesario la colocación de una batería de resistencias en paralelo a la carga inductiva. En ambos casos la relación ( $\tau$ ) que existe entre R y C; y R y L es igual a 0.0015.

## 10. Referencias

- [1] N. U.-E. 60071-1, «Coordinación de aislamiento,» 2006.
- [2] «ATPDraw,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.atpdraw.net/>.
- [3] C. Alosno Pinilla, «Desarrollo de trabajos con ATP para protecciones de los sistemas de energía eléctrica,» 2016.
- [4] «Red Eléctrica Española,» [En línea]. Available: <http://www.ree.es/>.
- [5] «Ecured,» [En línea]. Available: <https://www.ecured.cu/>.
- [6] R. Ramos del Solo, «Estudio de la maniobra controlada de interruptores en reactancias, bancos de condensadores, cables y transformadores,» 2015.
- [7] I. Pérez Guzmán, «Interruptores de potencia y extinción del arco eléctrico,» 2012.
- [8] I. de Sande Plaza, «Ingeniería básica de la instalación de una reactancia tipo "shunt" y estudio de los transitorios en maniobra,» 2016.

## 11. Anexo I: Ilustraciones

Ilustración 1. Fuente eléctrica modelada en ATP .....	21
Ilustración 2. Línea eléctrica de entrada modelada en ATP .....	22
Ilustración 3. Banco de condensadores modelada en ATP .....	23
Ilustración 4. Batería de resistencias para la simulación real del condensador modelada en ATP.....	23
Ilustración 5. Esquema básico de la conexión de un banco de condensadores real .....	24
Ilustración 6. Banco de reactancias real modelada en ATP .....	24
Ilustración 7. Esquema básico de la conexión de un reactor tipo shunt .....	25
Ilustración 8. Banco de condensadores modificado con resistencia en serie modelado en ATP .....	47
Ilustración 9. Esquema de la conexión de un banco de condensadores y resistencias en serie .....	47

Ilustración 10. Carga inductiva modificado con resistencia en paralelo modelado en ATP .....	51
Ilustración 11. Esquema de la conexión de un reactor tipo shunt y resistencias en paralelo .....	52

## 12. Anexo II: Tablas

Tabla 1. Tensiones soportadas normalizadas .....	11
Tabla 2. Tensión soportadas recomendadas .....	12
Tabla 3. Tensión soportadas normalizadas .....	12
Tabla 4. Nivel de aislamiento normalizado para la gama I .....	13
Tabla 5. Nivel de aislamiento normalizado para la gama II .....	14
Tabla 6. Resultados de la simulaciones realizadas en el punto de cierre con un banco de condensadores .....	27
Tabla 7. Resultados de la simulaciones realizadas en el punto de apertura con un banco de condensadores.....	32
Tabla 8. Resultados de la simulaciones realizadas en el punto de cierre con un banco de inductancias .....	36
Tabla 9. Resultados de las simulaciones realizadas en el punto de apertura con un banco de inductancias .....	41
Tabla 10. Tiempos de cierre de los interruptores.....	45
Tabla 11. Tiempos de apertura de los interruptores.....	48
Tabla 12. Tiempos de cierre de los interruptores.....	50
Tabla 13. Tiempos de apertura de los interruptores.....	53

## 13. Anexo III: Graficas

Gráfica 1. Tensión de la red en régimen permanente .....	26
Gráfica 2. Corriente de la red en régimen permanente, conectado un banco de condensadores .....	26
Gráfica 3. Corriente de la red en régimen permanente, conectado un reactor tipo shunt	26
Gráfica 4. Valores de la intensidad de la Tabla 6 .....	28
Gráfica 5. Valores de la tensión de la Tabla 6 .....	28

Gráfica 6. Tensión en el lado del banco de condensadores en la simulación 1 .....	29
Gráfica 7. Tensión en el lado de la red en la simulación 1 .....	29
Gráfica 8. Corriente en el lado del banco de condensadores en la simulación 1 .....	29
Gráfica 9. Tensión en el lado del banco de condensadores en la simulación 5 .....	30
Gráfica 10. Tensión en el lado de la red en la simulación 5 .....	30
Gráfica 11. Corriente en el lado del banco de condensadores en la simulación 5 .....	30
Gráfica 12. Tensión en el lado del banco de condensadores en la simulación 9 .....	31
Gráfica 13. Tensión en el lado de la red en la simulación 9 .....	31
Gráfica 14. Corriente en el lado del banco de condensadores en la simulación 9 .....	31
Gráfica 15. Valores de la intensidad de la Tabla 7 .....	33
Gráfica 16. Valores de tiempo de arco hasta la apertura del interruptor .....	33
Gráfica 17. Tensión de descarga del banco de condensadores en la simulación 1 .....	34
Gráfica 18. Tensión en el lado del banco de condensadores en la simulación 1 .....	34
Gráfica 19. Tensión en el lado de la red en la simulación 1 .....	34
Gráfica 20. Corriente en el lado del banco de condensadores en la simulación 1 .....	35
Gráfica 21. Valores de la intensidad de la Tabla 8 .....	36
Gráfica 22. Valores de la tensión de la Tabla 8 .....	36
Gráfica 23. Tensión en el lado de la carga inductiva en la simulación 1 .....	37
Gráfica 24. Tensión en el lado de la red en la simulación 1 .....	37
Gráfica 25. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 1 .....	37
Gráfica 26. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 1(II) .....	38
Gráfica 27. Tensión en el lado de la carga inductiva en la simulación 5 .....	38
Gráfica 28. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 5 .....	38
Gráfica 29. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 5 (II) .....	39
Gráfica 30. Tensión en el lado de la carga inductiva en la simulación 9 .....	39
Gráfica 31. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 9 .....	39
Gráfica 32. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 9 (II) .....	40
Gráfica 33. Valores de la intensidad de la Tabla 9 .....	41
Gráfica 34. Valores de tiempo de arco hasta la apertura del interruptor .....	42
Gráfica 35. Tensión en el lado de la carga inductiva en la simulación 1 .....	42
Gráfica 36. Tensión en el lado de la red en la simulación 1 .....	43
Gráfica 37. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 1 .....	43
Gráfica 38. Tensión en el lado de la carga inductiva en la simulación 5 .....	43
Gráfica 39. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 5 .....	44

Gráfica 40. Tensión en el lado de la carga inductiva en la simulación 9.....	44
Gráfica 41. Corriente en el lado de la carga inductiva en la simulación 9 .....	44
Gráfica 42. Tensión en el lado del banco de condensadores con maniobra controlada .	45
Gráfica 43. Corriente en el lado del banco de condensadores con maniobra controlada I .....	46
Gráfica 44. Corriente en el lado del banco de condensadores con maniobra controlada II .....	46
Gráfica 45. Tensión en el lado del banco de condensadores con maniobra controlada y resistencias en serie .....	47
Gráfica 46. Corriente en el lado del banco de condensadores con maniobra controlada y resistencia en serie.....	48
Gráfica 47. Tensión en el lado del banco de condensadores con maniobra controlada .	49
Gráfica 48. Tensión en el lado de la red con maniobra controlada .....	49
Gráfica 49. Tensión en el lado del banco de condensadores con maniobra controlada .	49
Gráfica 50. Tensión en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada.....	50
Gráfica 51. Corriente en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada.....	51
Gráfica 52. Tensión en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada y resistencias en paralelo.....	52
Gráfica 53. Corriente en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada y resistencia en paralelo .....	52
Gráfica 54. Tensión en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada .....	53
Gráfica 55. Tensión en el lado de la red con maniobra controlada .....	53
Gráfica 56. Corriente en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada.....	54
Gráfica 57. Tensión en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada y resistencia en paralelo .....	54
Gráfica 58. Corriente en el lado de la carga inductiva con maniobra controlada y resistencia en paralelo .....	54